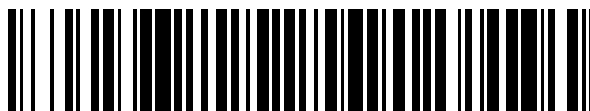


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 723 201**

51 Int. Cl.:

**G21B 1/15** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **04.09.2013 PCT/US2013/058093**

87 Fecha y número de publicación internacional: **13.03.2014 WO14039579**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **04.09.2013 E 13765855 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **20.02.2019 EP 2893536**

54 Título: **Inyector de haces neutros basado en iones negativos**

30 Prioridad:

**04.09.2012 RU 2012137795  
08.03.2013 US 201361775444 P**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**22.08.2019**

73 Titular/es:

**TAE TECHNOLOGIES, INC. (100.0%)  
19631 Pauling  
Foothill Ranch, CA 92610, US**

72 Inventor/es:

**BELCHENKO, YURI I.;  
BURDAKOV, ALEXANDER V.;  
DAVYDENKO, VLADIMIR I.;  
DIMOV, GENNADY I.;  
IVANOV, ALEXANDER A.;  
KOBETS, VALEERY V.;  
SMIRNOV, ARTEM N.;  
BINDERBAUER, MICHL W.;  
SEVIER, DONALD L. y  
RICHARDSON, TERRENCE E.**

74 Agente/Representante:

**CURELL SUÑOL, S.L.P.**

ES 2 723 201 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

## DESCRIPCIÓN

Inyector de haces neutros basado en iones negativos.

5 **Campo técnico**

El objeto descrito en la presente memoria se refiere, en general, a inyectores de haces neutros y, más particularmente, a un inyector de haces neutros basado en iones negativos.

10 **Antecedentes**

Hasta hace bien poco, los haces neutros usados en la investigación de la fusión magnética, el procesado de materiales, tratamientos de ataque químico, esterilización y otras aplicaciones, se formaban, todos ellos, a partir de iones positivos. Se extraían iones positivos de isótopos de hidrógeno y los mismos se aceleraban a partir de plasma de descarga en gas por medio de campos electrostáticos. Inmediatamente después del plano de tierra del acelerador, los mismos entraban en una célula de gas, en donde experimentaban tanto reacciones de intercambio de carga para adquirir un electrón, como reacciones de ionización por impacto para perderlo nuevamente. Debido a que la sección transversal de intercambio de carga, a medida que aumenta la energía, cae mucho más rápidamente que la sección transversal de ionización, la fracción neutra en equilibrio en una célula de gas gruesa comienza a disminuir rápidamente a energías mayores de 60 keV para partículas de hidrógeno. Para aplicaciones de haces neutros de isótopos de hidrógeno que requieren energías sustancialmente mayores que las mencionadas, es necesario producir y acelerar iones negativos, y, a continuación, convertirlos en partículas neutras en una célula de gas delgada, lo cual puede dar como resultado una fracción neutra de aproximadamente el 60% sobre una amplia gama de energías de hasta muchos MeVs. Pueden obtenerse fracciones neutras todavía mayores si se usa una célula de fotones o plasma para convertir haces de iones negativos energéticos en partículas neutras. En el caso de una célula de fotones, para la cual la energía fotónica supera la afinidad de electrón del hidrógeno, las fracciones neutras podrían estar cerca del 100%. Merece la pena señalar que la primera vez que se mencionó la idea de la aplicación de iones negativos en la física de aceleradores fue por parte de Alvarez hace más de 50 años [1].

Puesto que los haces neutros para la generación de corriente y la calefacción en dispositivos de fusión de mayor tamaño del futuro, así como para algunas aplicaciones en dispositivos actuales, requieren energías claramente por encima de las obtenibles con iones positivos, en los últimos años se han desarrollado haces neutros basados en iones negativos. No obstante, las corrientes de haces logradas hasta el momento son significativamente inferiores a la producida de manera bastante rutinaria por fuentes de iones positivos. Un motivo físico para el menor rendimiento de las fuentes de iones negativos en términos de la corriente del haz es la baja afinidad electrónica del hidrógeno, la cual es solamente de 0.75 eV. Por lo tanto, resulta mucho más difícil producir iones de hidrógeno negativos que sus equivalentes positivos. También resulta bastante difícil para los iones negativos recién generados alcanzar una región de extracción sin colisiones con electrones energéticos que, con una probabilidad muy alta, provocarán la pérdida del electrón extra unido débilmente. Asimismo, la extracción de iones  $H^-$  a partir de plasma para formar un haz es más complicada que con iones  $H^+$ , puesto que los iones negativos vendrán acompañados por una corriente de electrones mucho mayor a no ser que se apliquen medidas de supresión. Puesto que la sección eficaz para el desprendimiento por colisión del electrón de un ion  $H^-$  para producir un átomo es considerablemente mayor que la sección eficaz para que un ion  $H^+$  adquiera un electrón de una molécula de hidrógeno, la fracción de iones convertidos a partículas neutras durante la aceleración puede ser significativa a no ser que la densidad de la conducción de gas en el trayecto del acelerador se minimice haciendo funcionar la fuente de iones a una baja presión. Los iones neutralizados de forma prematura durante la aceleración forman una cola de baja energía, y, en general, presentan una divergencia mayor que aquellos que experimentan el potencial de aceleración completo.

La neutralización del haz de iones negativos acelerados se puede realizar en un blanco gaseoso con una eficiencia de aproximadamente el 60%. El uso de blancos de fotones y plasma permite el aumento adicional de la eficiencia de neutralización de iones negativos. La eficiencia energética global del inyector se puede incrementar mediante la recuperación de la energía de las especies iónicas que quedan en el haz después de pasar por un neutralizador.

En la figura 3 se muestra el diagrama esquemático de un inyector de haces neutros de alta potencia correspondiente al tokamak ITER, el cual es también típico de otros sistemas de confinamiento magnético de plasma utilizables en reactores y que están bajo consideración [2]. Los componentes básicos del inyector son una fuente de alta corriente de iones negativos, un acelerador de iones, un neutralizador y un separador magnético del componente cargado del haz con intercambio de carga por medio de colectores-recuperadores de iones.

Con el fin de mantener las condiciones requeridas de vacío en el inyector, típicamente se usa un sistema de bombeo de alto vacío con válvulas de compuerta de gran tamaño que interrumpen el conducto del haz proveniente del dispositivo de plasma y/o que proporcionan acceso a elementos principales del inyector. Los

parámetros del haz se miden usando blancos calorimétricos retráctiles, así como a través de procedimientos ópticos no invasivos. La producción de haces neutros potentes requiere el uso de una alimentación de energía correspondiente.

- 5 En función del principio de producción, las fuentes de iones negativos se pueden dividir en los siguientes grupos:
- fuentes (plasmáticas) de producción en el volumen - en las cuales se producen iones en el volumen de plasma;
  - 10 • fuentes de producción en superficie - en las cuales se producen iones en la superficie de electrodos o blancos especiales;
  - fuentes por interacción superficie-plasma - en las cuales se producen iones en las superficies de electrodos que interactúan con partículas del plasma, que fueron desarrolladas por el grupo de
  - 15 Novosibirsk [3]; y
  - fuentes por intercambio de cargas - en las cuales se producen iones negativos debido al intercambio de cargas de los haces de iones positivos acelerados sobre blancos diferentes.

20 Para generar plasma en fuentes modernas de iones H<sup>-</sup> en el volumen, de manera similar al de la fuente de iones positivos, se usan descargas de arco con filamentos calientes o cátodos huecos, así como descargas de RF en hidrógeno. Para la mejora del confinamiento de los electrones en la descarga y para la reducción de la densidad de hidrógeno en la cámara de descarga de gas, lo cual es importante para fuente de iones negativos, se usan descargas en un campo magnético. Los sistemas con un campo magnético externo (es decir, con geometría Penning o magnetrón de electrodos, con oscilación de electrones en el campo magnético longitudinal de la

25 descarga “reflectante”) y los sistemas con un campo magnético periférico (multipolar) son ampliamente utilizados. En la figura 4 se muestra una vista recortada de la cámara de descarga con un campo magnético periférico desarrollado para el inyector de haces neutros de JET [3]. El campo magnético en la periferia de la caja de plasma es producido por imanes permanentes instalados en su superficie exterior. Los imanes están dispuestos en filas en las cuales la dirección de magnetización es constante o cambia en un orden escalonado, de manera que las líneas del campo magnético presentan una geometría de cúspides lineales o en forma de tablero de

30 ajedrez cerca de la pared.

La aplicación de los sistemas con un campo magnético multipolar en la periferia de las cámaras de plasma en particular, permite que los sistemas mantengan un plasma denso en la fuente a la presión reducida de trabajo del gas de la cámara hasta entre 1 y 4 Pa (sin cesio) y hasta 0.3 Pa - en los sistemas con cesio [4]. Dicha reducción de la densidad de hidrógeno en la cámara de descarga resulta particularmente importante para fuentes gigantes de iones multiapertura de alta corriente que se están desarrollando para aplicaciones en la investigación de la fusión.

35

40 Por el momento, las fuentes de iones por producción mediante interacción superficie-plasma se consideran las más adecuadas para la producción de haces de iones negativos de alta corriente.

En las fuentes de iones por producción mediante interacción superficie-plasma los iones se producen en la interacción entre partículas que tienen suficiente energía y una superficie de baja función de trabajo. Este efecto se puede potenciar mediante el recubrimiento alcali de la superficie expuesta al bombardeo. Existen dos procesos principales, a saber, la ionización de superficie en equilibrio termodinámico, en la que el átomo o molécula lento que incide sobre la superficie es emitido de vuelta en forma de un ion positivo o negativo después de un tiempo de residencia medio, y la interacción (cinética) átomo-superficie, sin equilibrio, en la que se producen iones negativos por bombardeo iónico, desorción por impacto (por contraposición a la desorción térmica en la que las partículas térmicas son desorbidas) o reflexión en presencia de un recubrimiento de metal alcalino. En el proceso de la ionización en equilibrio termodinámico, las partículas adsorbidas se desprenden de la superficie en condiciones de equilibrio térmico. El coeficiente de ionización de las partículas que abandonan la superficie viene determinado por la fórmula de Saha y parece ser muy pequeño ~0,02%.

45

50

55 El proceso de ionización de superficie cinética sin equilibrio parece ser mucho más eficaz en la superficie y tiene una función de trabajo suficientemente baja comparable a la afinidad de electrón del ion negativo. Durante este proceso, el ion negativo se desprende de la superficie superando la barrera de superficie próxima con el uso de energía cinética adquirida a partir de la partícula primaria. Cerca de la superficie, el nivel de energía del electrón adicional es inferior al nivel de Fermi superior de los electrones en el metal, y este nivel puede ser ocupado muy fácilmente por la tunelización de electrones del metal. Durante el movimiento del ion saliendo de la superficie, el mismo supera una barrera de potencial producida por la carga imagen  $U_{\text{imagen}} = -\frac{e^2}{4x}$ . El campo de la carga imagen eleva el nivel de energía del electrón adicional con respecto a los niveles de energía de los electrones en el metal. A partir de cierta distancia crítica, el nivel del electrón adicional se hace mayor que el nivel de energía superior de los electrones en el metal, y la tunelización de resonancia devuelve el electrón del ion saliente de

60

65

vuelta al metal. En caso de que la partícula se esté desprendiendo de manera suficientemente rápida, el coeficiente de ionización negativa parece ser bastante alto para la superficie con baja función de trabajo que se puede proporcionar mediante cobertura con un metal alcalino, especialmente cesio.

5 Se ha demostrado experimentalmente que el grado de ionización negativa de partículas de hidrógeno que se desprenden de esta superficie con una función de trabajo disminuida puede llegar a ser  $\beta^- = \frac{j^-}{j^+ + j^0 + j^{++}} = 0,67$ . Cabe indicar que la función de trabajo en superficies de tungsteno tiene un valor mínimo con una cobertura de Cs de 0.6 monocapas (en una superficie de cristal de tungsteno 110).

10 Para el desarrollo de fuentes de iones negativos de hidrógeno, es importante que el rendimiento integral de iones negativos sea suficientemente alto,  $K = 9-25\%$ , para colisiones de átomos de hidrógeno e iones positivos con energías de 3-25 eV con superficies con baja función de trabajo, como Mo+Cs, W+Cs [5]. En particular, (véase la figura 5) en el bombardeo de una superficie de molibdeno recubierta con cesio, con átomos de Frank-Condon con una energía superior a 2 eV, la eficiencia de conversión integral a iones  $H^-$  puede llegar a ser  $K \sim 8\%$ .

15 En fuentes por interacción superficie-plasma (SPS) [3], la producción de iones negativos se realiza gracias a la ionización de superficie cinética - procesos de bombardeo iónico, desorción o reflexión en electrodos en contacto con el plasma de descarga en gas. Los electrodos de emisores especiales con una función de trabajo disminuida se usan en SPS para potenciar la producción de iones negativos. Por norma general, la adición de una pequeña cantidad de cesio a la descarga permite obtener un aumento variado de la luminosidad y la intensidad de haces de  $H^-$ . La diseminación de cesio en la descarga hace que se reduzca considerablemente el flujo consiguiente de electrones extraídos con los iones negativos.

20 En una SPS, el plasma de descarga en gas tiene varias funciones, a saber, producen flujos intensos de partículas que bombardean los electrodos; la envoltura del plasma adyacente al electrodo produce aceleración de iones, haciendo que aumente, así, la energía de las partículas de bombardeo; los iones negativos, que se producen en electrodos bajo potencial negativo, son acelerados por el potencial de la envoltura del plasma y pasan a través de la capa plasmática hacia la región de extracción sin destrucción considerable. En diversas modificaciones de una SPS bajo condiciones de descarga en gas "sucias" y un bombardeo intenso de los electrodos se obtuvo una producción intensa de iones negativos con eficiencias de energía y gas bastante altas.

25 Se han desarrollado varias fuentes SPS para dispositivos de fusión grandes como el LHD, el JT-60U y el tokamak internacional (ITER).

30 Las características típicas de estas fuentes pueden entenderse considerando el inyector de un stellarator LHD [4], el cual se muestra en la figura 6 [4, 6]. En una gran cámara con cerramiento en cubo (*bucket*) magnético multipolar con un volumen de  $\sim 100$  litros se produce plasma por arco. Veinticuatro filamentos de tungsteno sustentan el arco de 3 kA,  $\sim 80$  V, bajo una presión de hidrógeno de aproximadamente 0.3-0.4 Pa. Un filtro magnético externo con un campo máximo en el centro de  $\sim 50$  G proporciona la reducción de densidad de electrones y de temperatura en la región de extracción cerca del electrodo de plasma. La polarización positiva del electrodo de plasma ( $\sim 10$  V) hace que disminuya el flujo de electrones consiguiente. En el electrodo de plasma cubierto por una capa de cesio óptima se producen iones negativos. Hornos de cesio externos (tres para una fuente) equipados con válvulas neumáticas aportan la diseminación de cesio distribuida. La producción de iones negativos alcanza un máximo a la temperatura óptima del electrodo de plasma de 200-250°C. El electrodo de plasma está térmicamente aislado y su temperatura viene determinada por la descarga del plasma con cargas de potencia.

35 En la figura 7 se muestra un sistema óptico de iones multiapertura, de cuatro electrodos, que se usa en la fuente de iones LHD [6]. Se extraen iones negativos a través de 770 aberturas de emisión con un diámetro de 1.4 cm cada una de ellas. Las aberturas ocupan un área de  $25 \times 125$  cm<sup>2</sup> en el electrodo de plasma. En la rejilla de extracción se incorporan pequeños imanes permanentes entre aberturas para desviar los electrones coextraídos del haz sobre la pared del electrodo de extracción. Una rejilla adicional de supresión de electrones, instalada detrás de la rejilla de extracción suprime los electrones secundarios, retrodispersados o emitidos desde las paredes del electrodo extraídas. En la fuente de iones se usa una rejilla a tierra, con múltiples rendijas, con una alta transparencia. La misma reduce el área de intersección del haz, mejorando, así, la capacidad de mantenimiento del voltaje y reduciendo la presión de gas en los huecos en un factor de 2.5 con la correspondiente reducción de las pérdidas por desprendimiento del haz. Tanto el electrodo de extracción como el electrodo a tierra se refrigeran con agua.

40 La diseminación de cesio en la fuente multicúspide proporciona un aumento de 5 veces de una corriente de iones negativos extraídos y un crecimiento lineal de rendimiento de iones  $H^-$  en el amplio intervalo de potencias de descarga y presiones de llenado de hidrógeno. Otras ventajas importantes de la diseminación de cesio son una reducción de  $\sim 10$  veces de la corriente de electrones coextraídos y una disminución esencial de la presión de hidrógeno en la descarga, de hasta 0.3 Pa.

65

Las fuentes multicúspide en el LHD proporcionan rutinariamente de manera aproximada una corriente de iones de 30 A, cada una de ellas, con una densidad de corriente de 30 mA/cm<sup>2</sup> en impulsos de una duración de 2 segundos [6]. Los problemas principales de las fuentes de iones LHD es el bloqueo del cesio, que se disemina en la cámara de arco, por parte del tungsteno bombardeado iónicamente desde filamentos y la reducción de la capacidad de mantenimiento de un alto voltaje cuando se trabaja en el régimen de impulsos largos de alta potencia.

El inyector de haces neutros basado en iones negativos del LHD tiene dos fuentes de iones accionadas con hidrógeno con una energía de haz nominal de 180 keV. Cada inyector ha alcanzado la potencia de inyección nominal de 5 MW durante un impulso de 128 segundos, de manera que cada fuente de iones proporciona un haz neutro de 2.5 MW. La figura 8A y B muestra el inyector de haces neutros del LHD. La distancia focal de la fuente de iones es 13 m, y el punto de pivotamiento de las dos fuentes está situado 15.4 m aguas abajo. El puerto de inyección tiene una longitud de aproximadamente 3 m, teniendo la parte más estrecha un diámetro de 52 cm y una longitud de 68 cm.

Las fuentes de iones con controladores de plasma de RF y producción de iones negativos en un electrodo de plasma cubierto por cesio están siendo desarrolladas en IPP Garching. Los controladores de RF producen plasma más limpio, de manera que, en estas fuentes, no se produce ningún bloqueo del cesio por parte del tungsteno. La extracción en estado estable de un impulso de haces de iones negativos con una corriente de haz de 1 A, una energía de ~20 kV y una duración de 3600 segundos fue demostrada por el IPP en 2011.

En la actualidad, los inyectores de haces neutros de alta energía, que están siendo desarrollados para dispositivos de fusión de la siguiente fase, tales como, por ejemplo, el tokamak ITER, no han demostrado un funcionamiento estable a una energía deseada de 1 MeV y un funcionamiento en estado estable o de onda continua (CW) con una corriente suficientemente alta. Por lo tanto, existe una necesidad de desarrollar soluciones viables siempre que sea posible para resolver los problemas que evitan la consecución de los parámetros objetivo del haz, tales como, por ejemplo, una energía de haz en el intervalo de 500-1000 KeV, una densidad de corriente efectiva en partículas neutras del puerto del recipiente principal de 100-200 A/m<sup>3</sup>, una potencia por inyector de haces neutros de aproximadamente 5-20 MW, longitud de impulsos de 1000 segundos y cargas de gas introducidas por el inyector de haces que sean inferiores al 1-2% de la corriente de haz. Cabe indicar que la consecución de este objetivo resulta mucho menos exigente si la corriente de iones negativos en un módulo del inyector se reduce hasta una corriente de iones de extracción de 8-10 A en comparación con una corriente de iones de extracción de 40 A para el haz ITER. El descenso de la corriente extraída y de la potencia del haz daría como resultado fuertes alteraciones en el diseño de los elementos clave de la fuente de iones del inyector y del acelerador de alta energía, de manera que resultan aplicables tecnologías y planteamientos mucho mejor desarrollados que mejoran la fiabilidad del inyector. Por lo tanto, la presente consideración sugiere la corriente extraída de 8-10 A por módulo, bajo la suposición de que la potencia de inyección de salida requerida se puede obtener usando varios módulos inyectores que producen haces con baja divergencia y alta densidad de corriente.

El rendimiento de las fuentes por interacción superficie-plasma está bastante bien documentado y en la actualidad hay en funcionamiento varias fuentes de iones que han producido haces de iones escalables continuos con más de 1 A o valores superiores. Hasta el momento, los parámetros clave de los inyectores de haces neutros, como la potencia del haz y la duración de los impulsos, están bastante distanciados con respecto a aquellos requeridos para el inyector que se está considerando. El estado actual del desarrollo de estos inyectores puede entenderse a partir de la Tabla 1.

Tabla 1.

	TAE	ITER	JT-60U	LHD	IPP	CEA-JAERI
densidad de corriente (A/m <sup>2</sup> )		280 D <sup>-</sup> 280 H <sup>-</sup>	100 D <sup>-</sup>	350 H <sup>-</sup>	230 D <sup>-</sup> 330 H <sup>-</sup>	216 D <sup>-</sup> 195 H <sup>-</sup>
Energía de haz (keV)	1000 H <sup>-</sup>	1000 D <sup>-</sup> 100 H <sup>-</sup>	365	186	9	25
Duración del impulso (s)	≥1000	3600 D <sup>-</sup> 3 H <sup>-</sup>	19	10	<6	5 1000
Relación electrones/iones		1	~0.25	<1	<1	<1
presión (Pa)	0.3	0.3	0.26	0.3	0.3	0.35
comentarios		Números combinados todavía no obtenidos, experimentos en desarrollo en el	Fuente de filamentos	Fuente de filamentos	Fuente de RF, sin extracción completa, banco de pruebas	Fuente Kamabokolll (JAERI) en MANTIS (CEA)

	TAE	ITER	JT-60U	LHD	IPP	CEA-JAERI
		IPP Garching - la fuente de impulsos largos MANITU entrega ahora 1 A/20 kV durante hasta 3600 s con D <sup>-</sup>			conocido como BATMAN accionado a 2 A/20 kV durante ~6 s	

Por lo tanto, es deseable proporcionar un inyector de haces neutros mejorado.

Ejemplos de la técnica anterior en el campo de los haces de iones incluyen:

5 KATSUNORI IKEDA *ET AL*: "MAGNETICALLY CONFINED PLASMA; Recent Progress of Neutral Beam Injector and Beam Emission Diagnosis in LHD", PLASMA SCIENCE AND TECHNOLOGY, INSTITUTE OF PHYSICS PUBLISHING, BRISTOL, GB, vol. 11, nº 4, 1 de agosto de 2009 (01-08-2009), páginas 452-455, ISSN: 1009-0630;

10 A. SIMONIN *ET AL*: "Mirror-like plasma confinement for a uniform large negative ion source", NUCLEAR FUSION, vol. 52, nº 6, 17 de abril de 2012, página 063003, ISSN: 029-5515;

15 BEAUMONT *ET AL*: "Design and R&D for the heating systems", ITER-THE INTERNATIONAL SEMINAR, AIX-EN-PROVENCE, 22-24 de enero de 2007, páginas 72-82, Francia;

HAN B x *ET AL*: "Low-energy beam transport studies supporting the spallation neutron source 1-MW beam operation", REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, AIP, MELVILLE, NY, USA, vol. 83, nº 2, 1 de febrero de 2012, páginas 2B727-2B727, ISSN: 0034-6748;

20 KELLER R ED- LUCCIO A *ET AL*: "ion-source and low-energy beam transport issues for H<sup>-</sup> accelerators", PARTICLE ACCELERATOR CONFERENCE, 1999. PROCEEDINGS OF THE 1999 NEW YORK, NY, USA 27 de marzo a 2 de abril de 1999, PISCATAWAY, NJ, USA, IEEE, US vol. 1, 27 de marzo de 1999, páginas 87 a 91 ISBN: 978-0-7803-5573-6;

25 Y. TAKEIRI: "Negative ion source development for fusion application", REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, vol. 81, 26 de febrero de 2010 (26-02-2010), páginas 1 a 6; y TSUMORI K *ET AL*: "Stability of High Power Beam Injection in Negative-ion-Based LHD-NBI", SECOND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NEGATIVE IONS, BEAMS AND SOURCES: TAKAYAMA CITY, JAPÓN, 16 A 19 DE NOVIEMBRE DE 2010, páginas 517 a 525, ISBN: 978-0-7354-0955-2.

### Sumario de la invención

35 La presente solicitud proporciona un inyector de haces basado en iones negativos de acuerdo con las reivindicaciones que siguen.

Otros sistemas, procedimientos, características y ventajas de las formas de realización de ejemplo serán evidentes o llegarán a serlo, para alguien versado en la materia, tras examinar las siguientes figuras y la descripción detallada.

### 40 Breve descripción de las figuras

45 Los detalles de las formas de realización a modo de ejemplo, que incluyen la estructura y el funcionamiento, se pueden deducir, en parte, por el estudio de las figuras adjuntas, en las cuales los números de referencia equivalentes remiten a partes equivalentes. Los componentes de las figuras no están dibujados necesariamente a escala, poniéndose énfasis, en cambio, en la ilustración de los principios de la invención. Por otra parte, todas las ilustraciones están destinadas a transmitir conceptos, en las que las dimensiones y formas relativas, y otros atributos detallados, se pueden ilustrar esquemáticamente y no de manera literal o precisa.

50 La figura 1 es una vista en planta de un plano de un inyector de haces neutros basado en iones negativos.

La figura 2 es una vista isométrica en sección del inyector de haces neutros basado en iones negativos mostrado en la figura 1.

55 La figura 3 es una vista en planta de un inyector de alta potencia de partículas neutras correspondiente al tokamak ITER.

La figura 4 es una vista isométrica recortada de la cámara de descarga con un campo magnético periférico multipolar para el inyector de haces neutros JET.

5 La figura 5 es un diagrama que muestra el rendimiento integral de iones negativos formado por bombardeo de una superficie de Mo+Cs con átomos de H neutros y H molecular positivo en función de la energía incidente. Los rendimientos se potencian utilizando un tratamiento DC con cesio en comparación con solamente un pretratamiento con cesio de la superficie.

10 La figura 6 es una vista en planta de una fuente de iones negativos correspondiente al LHD.

La figura 7 es un esquema de un sistema óptico de iones multiapertura para la fuente del LHD.

La figura 8 A y B son vistas superior y lateral del inyector de haces neutros del LHD.

15 La figura 9 es una vista en sección de una fuente de iones.

La figura 10 es una vista en sección de una fuente de átomos de hidrógeno de baja energía.

20 La figura 11 es un gráfico que muestra las trayectorias de iones H<sup>-</sup> en el tramo de baja energía.

La figura 12 es una vista isométrica de un acelerador.

La figura 13 es un gráfico que muestra las trayectorias de iones en el tubo de aceleración.

25 La figura 14 es una vista isométrica de la tripleta de lentes cuadrupolares.

La figura 15 es un gráfico que muestra una vista superior (a) y una vista lateral (b) de las trayectorias de los iones en un acelerador de una línea de transporte de haces de alta energía.

30 La figura 16 es una vista isométrica de una disposición de un blanco de plasma.

La figura 17 es un gráfico que muestra resultados de cálculos bidimensionales de la deceleración del haz de iones en el recuperador.

35 Deberá indicarse que los elementos de estructuras o funciones similares se representan en general con números de referencia equivalentes con fines ilustrativos en todas las figuras. Deberá indicarse, también, que las figuras están únicamente destinadas a facilitar la descripción de las formas de realización preferidas.

### 40 Descripción detallada

Cada una de las características y enseñanzas adicionales que divulgan a continuación se puede utilizar por separado o en combinación con otras características y enseñanzas para proporcionar un nuevo inyector de haces neutros basado en iones negativos. A continuación, se describirán, con mayor detalle y en referencia a los dibujos adjuntos, ejemplos representativos de las formas de realización descritas en la presente memoria, utilizando dichos ejemplos muchas de estas características y enseñanzas adicionales tanto por separado como combinadas. Esta descripción detallada está destinada, únicamente, a enseñar a una persona versada en la materia detalles adicionales para poner en práctica aspectos preferidos de las presentes enseñanzas, y no está destinada a limitar el alcance de la invención. Por lo tanto, combinaciones de características y etapas divulgadas en la siguiente descripción detallada pueden no resultar necesarias para poner en práctica la invención en el sentido más amplio, y, por el contrario, se enseñan meramente con el fin de describir en particular ejemplos representativos de las presentes enseñanzas.

Por otra parte, las diversas características de los ejemplos representativos y las reivindicaciones dependientes se pueden combinar de maneras que no se enumeran de forma específica y explícita con el fin de proporcionar formas de realización útiles y adicionales de las presentes enseñanzas.

Formas de realización proporcionadas en la presente van dirigidas a un nuevo inyector de haces neutros basado en iones negativos con una energía de, preferentemente, alrededor de 500-1000 keV y una alta eficiencia energética total. La disposición preferida de una forma de realización de un inyector de haces neutros basado en iones negativos 100 se ilustra en las figuras 1 y 2. Tal como se representa, el inyector 100 incluye una fuente de iones 110, una válvula de compuerta 120, imanes deflectores 130 para desviar una línea de haz de baja energía, un soporte aislador 140, un acelerador de alta energía 150, una válvula de compuerta 160, un tubo neutralizador (mostrado esquemáticamente) 170, un imán separador (mostrado esquemáticamente) 180, una válvula de compuerta 190, paneles de bombeo 200 y 202, un tanque de vacío 210 (el cual forma parte de un recipiente de vacío 250 que se describe posteriormente), bombas de criosorción 220 y una tripleta de lentes cuadrupolares 230. El inyector 100, tal como se indica, comprende una fuente de iones 110, un acelerador 150 y un

neutralizador 170 para producir aproximadamente un haz de partículas neutras de 5 MW con una energía de aproximadamente 0.50 a 1.0 MeV. La fuente de iones 110 está situada dentro del tanque de vacío 210 y produce un haz de iones negativos de 9 A. El tanque de vacío 210 se polariza a -880 kV con respecto a tierra y está instalado en soportes aislantes 140 dentro de un tanque de diámetro mayor 240 llenado con gas SF<sub>6</sub>. Los iones producidos por la fuente de iones se preaceleran a 120 keV antes de su inyección en el acelerador de alta energía 150 por medio de un preacelerador de rejilla electrostática multiabertura 111 (véase la figura 9) en la fuente de iones 110, que se usa para extraer haces de iones del plasma y producir una aceleración hasta cierta fracción de la energía requerida del haz. El haz de 120 keV de la fuente de iones 110 pasa a través de un par de imanes deflectores 130, que posibilitan que el haz se desplace fuera del eje antes de entrar en el acelerador de alta energía 150. Los paneles de bombeo 202 mostrados entre los imanes deflectores 130 incluyen una partición y una trampa de cesio.

Se supone que la eficiencia de gas de la fuente de iones 110 es de aproximadamente el 30%. Una corriente de 9-10 A proyectada del haz de iones negativos se corresponde con un soplo de gas de 6-7 l·Torr/s en la fuente de iones 110. El gas neutro que fluye desde la fuente de iones 110 se acumula a una presión media, en el preacelerador 111, de aproximadamente  $2 \times 10^{-4}$  Torr. A esta presión, el gas neutro provoca una pérdida por desprendimiento del ~10% del haz de iones dentro del preacelerador 111. Entre los imanes deflectores 130 hay depósitos (no mostrados) para partículas neutras, que surgen del haz de iones negativos primario. Hay también depósitos (no mostrados) para iones positivos que fluyen de vuelta desde el acelerador de alta energía 150. Inmediatamente después de la preaceleración se usa una región de línea de transporte de haces de baja energía 205 con un bombeo diferencial de los paneles de bombeo 200 para reducir la presión de gas hasta  $\sim 10^{-6}$  Torr antes de que llegue al acelerador de alta energía 150. Esto introduce una pérdida adicional del haz de ~5%, pero, puesto que esto ocurre con una baja energía de preaceleración, la pérdida de potencia es relativamente pequeña. Las pérdidas por intercambio de carga en el acelerador de alta energía 150 están por debajo del 1% a la presión de fondo de  $10^{-6}$  Torr.

Después de una aceleración a la energía plena de 1 MeV, el haz entra en un neutralizador 170 en donde es convertido parcialmente en un haz neutro. Las especies de iones restantes son separadas por un imán 180 y se dirigen a los conversores de energía electrostáticos (no mostrados). El haz neutro pasa a través de la válvula de compuerta 190 y entra en una cámara de plasma 270.

El recipiente de vacío 250 está descompuesto en dos secciones. Una sección contiene el preacelerador 111 y la línea de haz de baja energía 205 en el primer tanque de vacío 210. Otra sección aloja una línea de haz de alta energía 265, el neutralizador 170 y conversores/recuperadores de energía de partículas cargadas en un segundo tanque de vacío 255. Las secciones del recipiente de vacío 250 están conectadas a través de una cámara 260 con el tubo acelerador de alta energía 150 en el interior.

El primer tanque de vacío 210 es el límite de vacío del preacelerador 111 y la línea de haz de baja energía 205, y el tanque de diámetro mayor o recipiente exterior 240 está presurizado con gas SF<sub>6</sub> para un aislamiento de alto voltaje. Los tanques de vacío 210 y 255 actúan como estructura de soporte para el equipo interior, tal como los imanes 130, las bombas de criosorción 220, etc. La eliminación de calor de los componentes internos sometidos a calentamiento se logrará con tubos de refrigeración, que deben presentar brechas de aislamiento en el caso del primer tanque de vacío 210, el cual se polariza a -880 kV.

#### 45 Fuente de iones:

En la figura 9 se muestra un diagrama esquemático de la fuente de iones 110. La fuente de iones incluye: rejillas de preacelerador multiabertura electrostáticas 111, aislantes cerámicos 112, controladores de plasma de tipo RF 113, imanes permanentes 114, una caja de plasma 115, canales y colectores de refrigeración por agua 116, y válvulas de gas 117. En la fuente de iones 110, se usa una superficie de molibdeno tratada con cesio, de las rejillas de preacelerador de plasma 111, para convertir los iones positivos y átomos neutros formados por los controladores de plasma 113, en iones negativos en un volumen de expansión de plasma (el volumen entre los controladores 113 y las rejillas 111, indicado por la llave denominada "PE" en la figura 9) con una contención de cubo (*bucket*) magnético multipolar según proporcionan los imanes permanentes 114.

En condiciones optimizadas para la producción de iones negativos se aplica un voltaje de polarización negativo para la captación de los electrones en las rejillas de preacelerador de plasma 111. La conformación geométrica de las aberturas 111B en las rejillas de preacelerador de plasma 111 se usa para focalizar iones H<sup>+</sup> en las aberturas 111B de la rejilla de extracción. Un pequeño filtro magnético transversal producido con imanes permanentes externos 114 se usa para reducir la temperatura de electrones difundidos desde la región del controlador o la región de emisor PE de plasma de la caja de plasma 115 hacia la región de extracción ER de la caja de plasma 115. Los electrones en el plasma son reflejados de vuelta desde la región de extracción ER por el pequeño campo del filtro magnético transversal producido por imanes permanentes externos 114. Los iones se aceleran a 120 keV antes de su inyección en el acelerador de alta energía 150 por parte de las rejillas de plasma de preacelerador multiabertura electrostáticas 111 en la fuente de iones 110. Antes de la aceleración a alta energía, el haz de iones tiene aproximadamente un diámetro de 35 cm. Por lo tanto, la fuente de iones 110 tiene



que producir 26 mA/cm<sup>2</sup> en las aberturas 111B suponiendo una transparencia del 33% en las rejillas de plasma de preacelerador 111.

El plasma, que alimenta la caja de plasma 115, es producido por una matriz de controladores de plasma 113 instalados en una brida posterior 115A de la caja de plasma, la cual es, preferentemente, una cámara de cobre cilíndrica refrigerada por agua (diámetro de 700 mm por longitud de 170 mm). El extremo abierto de la caja de plasma 115 está cerrado por las rejillas de plasma de preacelerador 111 del sistema de extracción y aceleración.

Se supone que los iones negativos deben producirse en la superficie de las rejillas 111 de plasma, que están cubiertas con una capa fina de cesio. El cesio se introduce en la caja de plasma 115 mediante el uso de un sistema de suministro de cesio (no mostrado en la figura 9).

La fuente de iones 110 está rodeada por imanes permanentes 114 para formar una configuración de cúspides lineales con vistas a los confinamientos de plasma y electrones primarios. Las columnas de imanes 114A en la pared cilíndrica de la caja de plasma 115 están conectadas en la brida posterior 115A por filas de imanes 114B que también se encuentran en una configuración de cúspides lineales. Un filtro magnético cerca del plano de las rejillas de plasma 111 divide la caja de plasma 115 en el emisor de plasma PE y la región de extracción ER. Los imanes de filtro 114C están instalados en una brida 111A junto a las rejillas de plasma 111 para proporcionar un campo magnético transversal ( $B=107$  G en el centro) el cual sirve para evitar que electrones primarios energéticos que provienen de los controladores de iones 113 lleguen a la región de extracción ER. No obstante, iones positivos y electrones de baja energía se pueden difundir cruzando el filtro hacia la región de extracción ER.

Un sistema de extracción y preacelerador de electrodos 111 comprende cinco electrodos 111C, 111D, 111E, 111F y 111G, que tienen, cada uno de ellos, 142 orificios o aberturas 111B formados en ortogonal a través de los mismos y usados para proporcionar un haz de iones negativos. Las aberturas de extracción 111B tienen un diámetro, cada una de ellas, de 18 mm, de manera que el área total de extracción de iones de las 142 aberturas de extracción es aproximadamente 361 cm<sup>2</sup>. La densidad de corriente de iones negativos es 25 mA/cm<sup>2</sup> y es necesaria para producir un haz de iones de 9 A. El campo magnético de los imanes de filtro 114C se extiende hacia los huecos entre las rejillas electrostáticas de extractor y preacelerador 111 con el fin de desviar electrones coextraídos sobre ranuras en la superficie interior de las aberturas 111B en los electrodos de extracción 111C, 111D y 111E. El campo magnético de los imanes de filtro magnético 114C junto con el campo magnético de imanes adicionales 114D proporciona la desviación e interceptación de los electrones, coextraídos con iones negativos. Los imanes adicionales 114D incluyen una matriz de imanes instalados entre los soportes de los electrodos de acelerador 111F y 111G de la rejilla de acelerador situada aguas abajo con respecto a la rejilla de extracción que comprende electrodos de extracción 111C, 111D y 111E. El tercer electrodo de rejilla 111E, que acelera iones negativos a una energía de 120 keV, está polarizado positivamente con respecto al electrodo de rejilla conectado a tierra 111D, para reflejar iones positivos en corriente de retorno que entran en la rejilla de preacelerador.

Los controladores de plasma 113 incluyen dos alternativas, a saber, un controlador de plasma (del inglés "plasma driver") de RF y un controlador atómico por descarga en arco. En el controlador atómico se usa un controlador de plasma de arco por descarga en arco, desarrollado por el BINP. Una de las características del controlador de plasma por descarga en arco consiste en la formación de un chorro de plasma dirigido. Los iones en el chorro de expansión se mueven sin colisiones y, debido a la aceleración por la caída del potencial de plasma ambipolar, alcanzan energías de ~5-20 eV. El chorro de plasma se puede dirigir sobre una superficie inclinada de molibdeno o tantalio del conversor (véase 320 en la figura 10), en el que, como consecuencia de la neutralización y la reflexión del chorro, se produce una corriente de átomos de hidrógeno. La energía de los átomos de hidrógeno se puede incrementar más allá del 5-20 eV inicial mediante la polarización negativa del conversor con respecto a la caja de plasma 115. En el Instituto Budker se llevaron a cabo, en 1982-1984, experimentos sobre la obtención de corrientes intensivas de átomos con un conversor del tipo mencionado.

En la figura 10, se muestra la disposición desarrollada de una fuente de átomos de baja energía 300 de manera que incluye una válvula de gas 310, un inserto de cátodo 312, una alimentación eléctrica pasante a un calefactor 314, colectores de agua refrigerante 316, un emisor de electrones de LaB6 318 y un conversor de iones-átomos 320. En experimentos, se ha producido un fujo de átomos de hidrógeno con una corriente equivalente de 20-25 A y una energía que varía en el intervalo de 20 eV a 80 eV con una eficiencia de más del 50%.

En la fuente de iones negativos se puede usar una fuente del tipo mencionado para suministrar a los átomos una energía optimizada para la generación eficiente de iones negativos en la superficie, tratada con cesio, de rejillas de plasma 111.

#### Línea de transporte de haces de baja energía

Los iones H<sup>-</sup> generados y preacelerados a una energía de 120 keV por la fuente de iones 110 en su paso a lo largo de la línea de transporte de haces de baja energía 205 son desplazados en perpendicular a su dirección de

movimiento en 440 mm con una desviación por el campo magnético periférico de la fuente de iones 110 y por un campo magnético de dos imanes desviadores especiales en forma de cuña 130. Este desplazamiento del haz de iones negativos en la línea de transporte de haces de baja energía 205 (según se ilustra en la figura 11) se proporciona para separar la fuente de iones 110 y las regiones de acelerador de alta energía 150. Este desplazamiento se usa para evitar la penetración de átomos rápidos originados a partir del desprendimiento del haz de H<sup>-</sup> sobre hidrógeno residual en el tubo de aceleración 150, para reducir corrientes de cesio e hidrógeno provenientes de la fuente de iones 110 hacia el tubo de aceleración 150, y también para la supresión de un flujo de iones secundarios provenientes del tubo de aceleración 150 hacia la fuente de iones 110. En la figura 11, se muestran las trayectorias calculadas de los iones H<sup>-</sup> en la línea de transporte de haces de baja energía.

#### Conducto del haz de alta energía

El haz de baja energía que sale de la línea de haces de baja energía entra en un acelerador multiabertura electrostático convencional 150 mostrado en la figura 12.

En la figura 13 se muestran los resultados del cálculo de la aceleración del haz de iones negativos de 9A que tiene en cuenta la contribución de la carga espacial. Los iones son acelerados de una energía de 120 keV hasta 1 MeV. El potencial de aceleración en el tubo 150 es 880 kV, y la etapa potencial entre los electrodos es 110 kV.

El cálculo muestra que la intensidad del campo no supera los 50 kV/cm en el tubo de aceleración optimizado 150 sobre los electrodos en las zonas de posible desarrollo de descarga de electrones.

Después de la aceleración, el haz pasa a través de una tripleta 230 de lentes cuadrupolares convencionales industriales 231, 232 y 233 (figura 14), que se usan para compensar el ligero desenfoque del haz en la salida del tubo de aceleración 150 y para formar un haz con un tamaño preferido en el puerto de salida. La tripleta 230 está instalada dentro del tanque de vacío 255 de la línea de transporte de haces de alta energía 265. Cada una de las lentes cuadrupolares 231, 232 y 233 incluye un conjunto convencional de electroimanes cuadrupolares que producen campos de focalización magnéticos habituales como los que se encuentran en todos los aceleradores de partículas convencionales modernos.

En la figura 15 se muestran las trayectorias calculadas de un haz de iones negativos de 9 A con la temperatura transversal de 12 eV en el tubo de aceleración 150, las lentes cuadrupolares 230 y la línea de transporte de haces de alta energía 265. El cálculo sigue el haz más allá de su punto de focalización.

El diámetro calculado del haz neutro con una corriente equivalente de 6A después del neutralizador a la distancia de 12.5 m a media altura del perfil radial es 140 mm y el 95 % de la corriente del haz se encuentra en una circunferencia de 180 mm de diámetro.

#### Neutralización

El neutralizador de fotoeliminación 170 seleccionado para el sistema de haz puede lograr un desprendimiento mayor del 95% del haz de iones. El neutralizador 170 comprende una matriz de lámparas de xenón y una trampa de luz cilíndrica con paredes altamente reflectantes para proporcionar la densidad de fotones requerida. Para dar acomodo a un flujo de potencia en las paredes de aproximadamente 70 kW/cm<sup>2</sup> se usan espejos refrigerados con una reflectividad superior a 0.99. En una alternativa, podría usarse, en su lugar, un neutralizador de plasma que haga uso de tecnología convencional, pero con la contrapartida de una ligera reducción de la eficiencia. No obstante, una eficiencia de neutralización de ~85% de una célula de plasma es claramente suficiente si el sistema de recuperación de energía tiene una eficiencia >95%, según se ha previsto.

El plasma del neutralizador de plasma está confinado en una cámara cilíndrica 175 con un campo magnético multipolar en las paredes, el cual es producido por una matriz de imanes permanentes 172. En la figura 16 se muestra una vista general del dispositivo de confinamiento. El neutralizador 170 incluye distribuidores de agua refrigerante 171, imanes permanentes 172, conjuntos de cátodo 173 y cátodos de LaB6 174.

La cámara cilíndrica 175 tiene una longitud de 1.5-2 m y tiene aberturas en los extremos para que el haz pase a través de las mismas. El plasma se genera usando varios conjuntos de cátodo 173 instalados en el centro de la cámara de confinamiento 175. Cerca del centro del dispositivo 170 se suministra gas de trabajo. En los experimentos con un prototipo de un neutralizador de plasma 170 del tipo mencionado, se observó que el confinamiento de electrones por parte de los campos magnéticos multipolares 172 en las paredes es suficientemente bueno y considerablemente mejor que el correspondiente de los iones de plasma. Para igualar las pérdidas de iones y electrones, en el plasma se desarrolla un potencial negativo considerable, de manera que los iones son confinados eficazmente por el campo eléctrico.

Un confinamiento razonablemente prolongado del plasma da como resultado una potencia relativamente baja de la descarga requerida para mantener una densidad de plasma de aproximadamente 10<sup>13</sup> cm<sup>-3</sup> en el neutralizador 170.

Recuperación de energía

5 Existen razones objetivas para la consecución de una eficiencia de energía elevada en nuestras condiciones. Ante todo, se trata de: una corriente relativamente pequeña del haz de iones y una baja dispersión de energía. En el esquema descrito en la presente memoria, con el uso de blancos de plasma o de vapor metálico, puede esperarse que la corriente residual de iones sea de ~3A después del neutralizador. Estas corrientes de iones rechazados con carga o bien positiva o bien negativa serán desviadas por medio del imán deflector 180 hacia dos recuperadores de energía, cada uno de ellos para iones positivos y negativos, respectivamente. Se han llevado a cabo simulaciones numéricas de la deceleración de estos haces de iones rechazados residuales con, típicamente, una energía de 1 MeV y 3A en los conversores directos dentro de los recuperadores sin ninguna compensación de la carga espacial. El conversor directo convierte una parte sustancial de la energía contenida en el haz de iones rechazados residuales, directamente en electricidad, y suministra el resto de la energía en forma de calor de alta calidad para su incorporación en el ciclo térmico. Los conversores directos siguen el diseño de un decelerador multiabertura electrostático, con lo cual secciones consecutivas de electrodos cargados producen los campos de ruptura longitudinal y absorben la energía cinética de los iones.

La figura 17 muestra los resultados de cálculos bidimensionales de la deceleración del haz de iones en el conversor. A partir de los cálculos presentados, se deduce que la deceleración del haz de iones con una energía de 1 MeV hasta una energía de 30 keV es bastante viable, con lo cual puede lograrse el valor del factor de recuperación de 96-97%.

Intentos previos de desarrollo de inyectores de haces neutros de alta potencia basados en iones negativos se han analizado de manera que revelan problemas críticos que evitan, hasta el momento, la obtención de inyectores con un funcionamiento en régimen estacionario estable de ~1 MeV y varios MW de potencia. Entre ellos los más importantes están:

- control de la capa de cesio, y pérdida y redeposición (control de temperatura, etc.)
- optimización de la producción en superficie de iones negativos para la extracción
- separación de electrones en flujo conjunto
- falta de homogeneidad del perfil de la corriente de iones en la rejilla de plasma debido a campos magnéticos internos
- baja densidad de corriente de iones
- los aceleradores son complicados y todavía está desarrollándose una gran cantidad de tecnologías nuevas (baja capacidad de mantenimiento del voltaje, aislantes grandes, etc.)
- corriente de retorno de iones positivos
- las tecnologías avanzadas de los neutralizadores (plasma, fotones) no se han demostrado en condiciones relevantes
- la conversión de energía no está desarrollada suficientemente
- bloqueo del haz en el conducto

Las soluciones innovadoras a los problemas presentados en la presente memoria se pueden agrupar en función del sistema con el que están relacionadas, a saber, fuente de iones negativos, extracción/aceleración, neutralizador, conversores de energía, etc.

#### 1.0 Fuente de iones negativos 110:

1.1. Las paredes internas de una caja de plasma 115 y de los controladores de plasma 113 permanecen a una temperatura elevada (150-200°C) para evitar la acumulación de cesio en sus superficies.

La temperatura elevada:

- evita una liberación incontrolada de cesio debido a la desorción/el bombardeo iónico y reduce su penetración en el sistema óptico de iones (rejillas 111),
- reduce la absorción y la recombinación de átomos de hidrógeno en la capa de cesio en las paredes,

- reduce el consumo y la contaminación de cesio.

Para lograr esto, a través de todos los componentes se hace circular un fluido a alta temperatura. La temperatura de las superficies se estabiliza adicionalmente por medio de un control de realimentación activo, es decir: o bien se elimina o bien se añade calor durante el funcionamiento de CW y los regímenes transitorios. Por contraposición a este planteamiento, la totalidad del resto de inyectores de haces existentes y planificados usan sistemas pasivos con refrigeración por agua y rupturas térmicas entre los tubos refrigerantes y los cuerpos calientes de los electrodos.

10 1.2. Se suministra cesio a través de un colector de distribución directamente sobre la superficie de las rejillas de plasma 111, no en el plasma. El suministro de cesio a través de un colector de distribución:

- proporciona un suministro controlado y distribuido de cesio durante todo el tiempo de activación del haz,
- 15 - evita la escasez de cesio debida típicamente al bloqueo por el plasma,
- reduce la liberación de cesio desde el plasma después de su acumulación y desbloqueo durante impulsos largos.

20 Por contraposición, las fuentes de iones existentes suministran cesio directamente a la cámara de descarga.

#### 2.0 Preacelerador (100-keV) 111:

25 2.1. El campo magnético usado para desviar electrones coextraídos en las regiones de extracción y preaceleración de iones se produce con imanes externos, no con imanes incorporados en el cuerpo de las rejillas, según se adoptó en diseños previos:

- las líneas de campo magnético en los huecos de alto voltaje entre las rejillas se hacen cóncavas en todos los lugares hacia las rejillas polarizadas negativamente, es decir, hacia la rejilla de plasma en el hueco de extracción y hacia la rejilla de extracción en el hueco de preaceleración. La concavidad de las líneas de campo magnético hacia las rejillas polarizadas negativamente evita la aparición de trampas de Penning locales en los huecos de alto voltaje y el atrapamiento/multiplicación de electrones coextraídos, como puede ocurrir en configuraciones con imanes incorporados.
- 30 - los electrodos del sistema óptico de iones (IOS) (rejillas 111) sin imanes incorporados NIB de "baja temperatura" se podrían calentar hasta una temperatura elevada (150-200°C) y se posibilita la eliminación de calor durante impulsos largos mediante el uso de líquidos calientes (100-150°C).
- la ausencia de imanes incorporados ahorra espacio entre las aberturas de emisión de las rejillas y permite la introducción de canales más eficientes de calentamiento/refrigeración de los electrodos.
- 40

Por contraposición, los diseños previos utilizan imanes incorporados en el cuerpo de la rejilla. Esto conduce a la creación de trampas magnetoeléctricas estáticas en los huecos de alto voltaje que atrapan y multiplican los electrones coextraídos. Esto puede provocar una reducción significativa de la corriente del haz extraído. Esto evita, además, un funcionamiento de temperatura elevada así como un rendimiento adecuado de calentamiento/refrigeración, lo cual es crítico para un funcionamiento con impulsos largos.

50 2.2. Todos los electrodos del sistema óptico de iones (rejillas 111) se mantienen, siempre, a una temperatura elevada (150-200°C) para evitar la acumulación de cesio en sus superficies y para incrementar la intensidad del alto voltaje de los huecos de extracción y preaceleración. Por contraposición, en diseños convencionales, los electrodos se refrigeran con agua. Los electrodos presentan temperaturas elevadas debido a que hay rupturas térmicas entre los tubos refrigerantes y los cuerpos de los electrodos, y no se produce ninguna realimentación activa.

55 2.3. El calentamiento inicial de las rejillas 111 en el arranque y la eliminación de calor durante la fase de actividad del haz se llevan a cabo haciendo correr un líquido caliente con una temperatura controlable a través de los canales internos dentro de las rejillas 111.

60 2.4. Se bombea adicionalmente gas desde el hueco de preaceleración a través del espacio lateral y las aberturas grandes en los soportes de las rejillas con el fin de reducir la presión de gas a lo largo de la línea del haz y suprimir el desprendimiento de iones negativos y la producción/multiplicación de partículas secundarias en los huecos.

65 2.5. La inclusión de rejillas polarizadas positivamente 111 se usa para rechazar iones positivos en corriente de retorno.

3.0 Acelerador de alto voltaje (1 MeV) 150:

3.1. El acelerador de alto voltaje 150 no está acoplado directamente a la fuente de iones, sino que está separado con respecto a la fuente de iones por una zona de transición (línea de transporte de haces de baja energía - LEBT 205) con imanes desviadores 130, bombas de vacío y trampas de cesio. La zona de transición:

- intercepta y elimina la mayoría de las partículas en co-corriente incluyendo electrones, fotones y partículas neutras del haz,
- bombea hacia fuera gas que surge de la fuente de iones 110 y evita que el mismo llegue al acelerador de alto voltaje 150,
- evita que fluya cesio fuera de la fuente de iones 110 y que el mismo penetre en el acelerador de alto voltaje 150,
- evita que electrones y partículas neutras, producidas por el desprendimiento de iones negativos, entren en el acelerador de alto voltaje 150.

En los diseños previos, la fuente de iones está conectada directamente al acelerador de alto voltaje. Esto provoca que el acelerador de alto voltaje esté sujeto a todos los flujos de gas, de partículas cargadas y de cesio provenientes de la fuente de iones y viceversa. Esta fuerte interferencia reduce la capacidad de mantenimiento del voltaje del acelerador de alto voltaje.

3.2. Imanes desviadores 130 en el LEBT 205 desvían y focalizan el haz sobre el eje del acelerador. Los imanes desviadores 130:

- compensan cualquier deriva y desviación del haz durante el transporte a través del campo magnético de la fuente de iones 110,
- la deriva entre los ejes del preacelerador y el acelerador de alto voltaje 111 y 150 reduce la afluencia de partículas en co-corriente al acelerador de alto voltaje 150 y evita que las partículas altamente aceleradas vuelvan en corriente de retorno (iones positivos y partículas neutras) al preacelerador 111 y a la fuente de iones 110.

Por contraposición, los sistemas previos no disponen de ninguna separación física entre las etapas de aceleración y, por lo tanto, no permiten derivas axiales según se incluye en la presente memoria.

3.3. Los imanes de la línea de haz de baja energía 205 focalizan el haz en la entrada del acelerador de una sola abertura 150:

- la focalización del haz facilita la homogeneidad del haz que entra en el acelerador 150 en comparación con los sistemas de rejilla multiabertura.

3.4. Aplicación de un acelerador de una sola abertura:

- simplifica la alineación del sistema y la focalización del haz
- facilita el bombeo de gas y la eliminación de partículas secundarias del acelerador de alta energía 150
- reduce pérdidas del haz en los electrodos del acelerador de alta energía 150.

3.5. Las lentes magnéticas 230 se usan después de la aceleración para compensar una sobrefocalización en el acelerador 150 y para formar un haz casi paralelo.

En los diseños convencionales, no hay medios para la focalización y la desviación del haz, excepto en el propio acelerador.

4.0 Neutralizador 170:

4.1 El neutralizador de plasma basado en un sistema de confinamiento de plasma multicúspide con imanes permanentes de campo elevado en las paredes;

- incrementa la eficiencia de neutralización,
- minimiza las pérdidas globales del inyector de haces neutros.

Estas tecnologías nunca se han considerado con vistas a su aplicación en inyectores de haces neutros a gran escala.

4.2 Neutralizador de fotones -trampa de fotones basada en una cavidad cilíndrica con paredes altamente reflectantes y bombeo con láseres de alta eficiencia.

- 5
- incrementa adicionalmente la eficiencia de neutralización,
  - minimiza adicionalmente las pérdidas globales del inyector de haces neutros.

Estas tecnologías nunca se han considerado con vistas a su aplicación en inyectores de haces neutros a gran escala.

10

#### 5.0 Recuperadores:

5.1 Aplicación de recuperador(es) de energía de iones residuales:

- 15
- incrementa la eficiencia global del inyector.

Por contraposición, la recuperación no se prevé en diseños convencionales en absoluto.

#### **Referencias:**

20

[1.] L. W. Alvarez, Rev. Sci, Instrum. 22, 705 (195)

[2.] R.Hemsworth et al. Rev. Sc. Instrum., Vol. 67, p. 1120 (1996)

25

[3.] Capitelli M. y Gorse C. IEEE Trans on Plasma Sci, 33, nº 6, págs. 1832-1844 (2005)

[4.] Hemsworth R. S., Inoue T., IEEE Trans on Plasma Sci, 33, nº. 6, págs. 1799-1813 (2005)

30

[5.] B. Rasser, J. van Wunnik y J. Los Surf. Sci. 118 (1982), p. 697 (1982)

[6.] Y. Okumura, H. Hanada, T. Inoue et al., AIP Conf. Proceedings # 210, NY, págs. 169-183 (1990)

35

[7.] O. Kaneko, Y. Takeiri, K. Tsumori, Y. Oka, y M. Osakabe et al., "Engineering prospects of negative-ion-based neutral beam injection system from high power operation for the large helical device", Nucl. Fus., vol. 43, págs. 692-669, 2003.

Aunque la invención es susceptible de varias modificaciones, y de formas alternativas, en los dibujos se han mostrado ejemplos específicos de la misma y estos se han descrito de forma detallada en la presente memoria.

40

El alcance de la invención queda definido por las reivindicaciones adjuntas.

**REIVINDICACIONES**

- 5 1. Inyector de haces neutros basado en iones negativos que comprende una fuente de iones (110) adaptada para producir un haz de iones negativos, un acelerador (150) y un neutralizador (170),
- 10 en el que el inyector de haces neutros basado en iones negativos comprende además un preacelerador (111) acoplado a la fuente de iones, y
- en el que el acelerador está separado de la fuente de iones por una zona de transición (205) interpuesta entre el preacelerador y el acelerador,
- y caracterizado por que
- 15 el inyector comprende además un par de imanes deflectores (130), en la zona de transición e interpuestos entre el preacelerador y el acelerador, estando configurado el par de imanes deflectores para permitir que un haz proveniente del preacelerador se desplace fuera de eje con respecto a un eje del preacelerador y sobre un eje del acelerador antes de entrar en el acelerador, de tal manera que se reduce la afluencia de partículas en co-corriente hacia el acelerador y se evita la corriente de retorno de partículas aceleradas hacia el preacelerador y la fuente de iones.
- 20 2. Inyector según la reivindicación 1, en el que la fuente de iones incluye una caja de plasma y unos controladores de plasma, y en el que unas paredes internas de la caja de plasma (115) y de los controladores de plasma (113) están configuradas para funcionar a temperaturas elevadas de aproximadamente 150-200°C con el fin de evitar la acumulación de cesio en sus superficies.
- 25 3. Inyector según las reivindicaciones 1 o 2, en el que la fuente de iones está adaptada para producir aproximadamente un haz de iones negativos de 9 A.
- 30 4. Inyector según las reivindicaciones 1 o 2, en el que el preacelerador (111) es una rejilla multiabertura electrostática en la fuente de iones, o en el que los iones provenientes de la fuente de iones son preacelerados por el preacelerador a 120 kV antes de su inyección en el acelerador.
- 35 5. Inyector según la reivindicación 2, en el que la caja y los controladores de plasma incluyen colectores y pasos de fluido (116) para hacer circular fluido a alta temperatura.
6. Inyector según la reivindicación 4, que comprende, además, un colector de distribución para suministrar directamente cesio en rejillas de plasma del preacelerador (111).

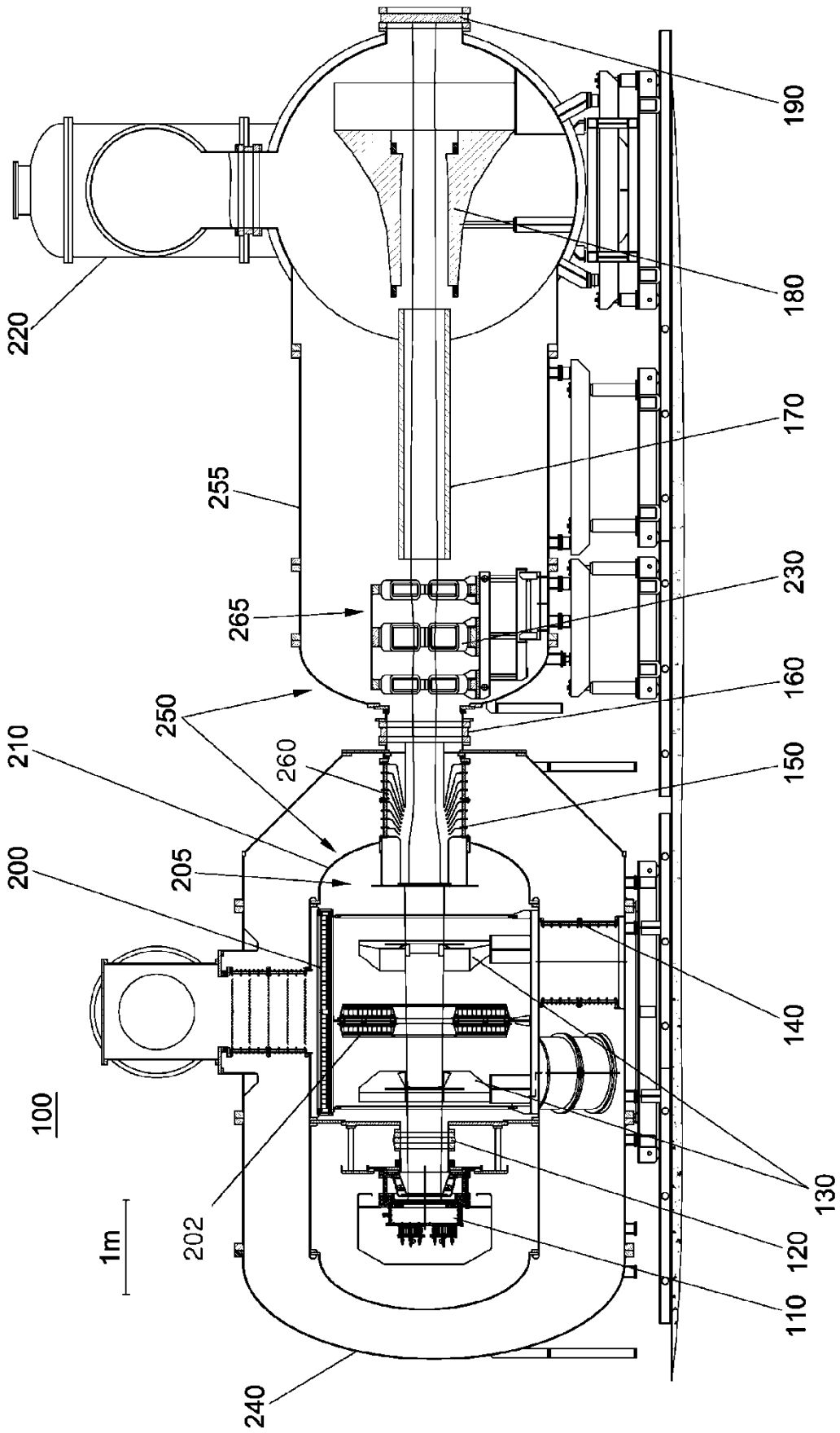


FIGURA 1



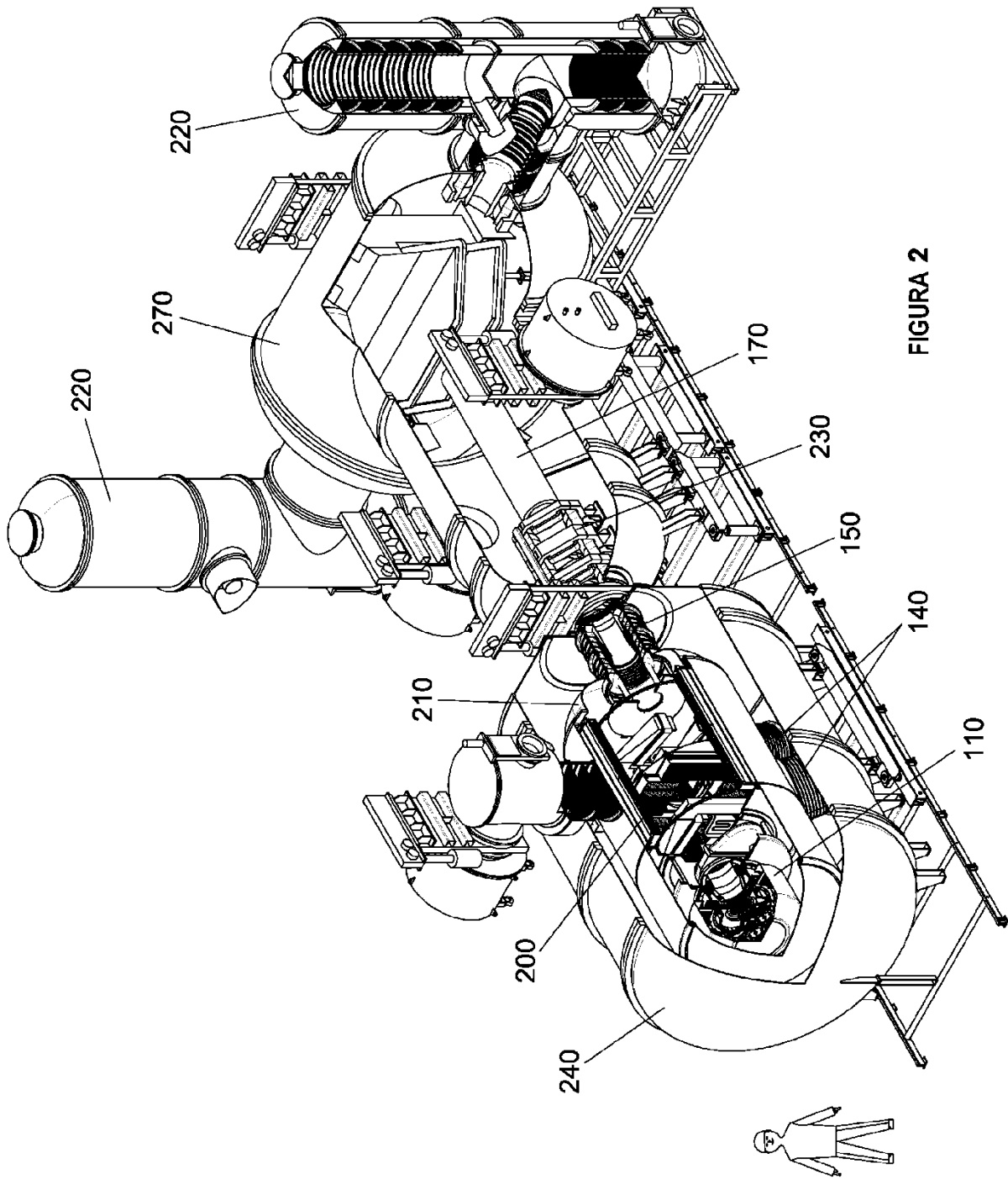


FIGURA 2

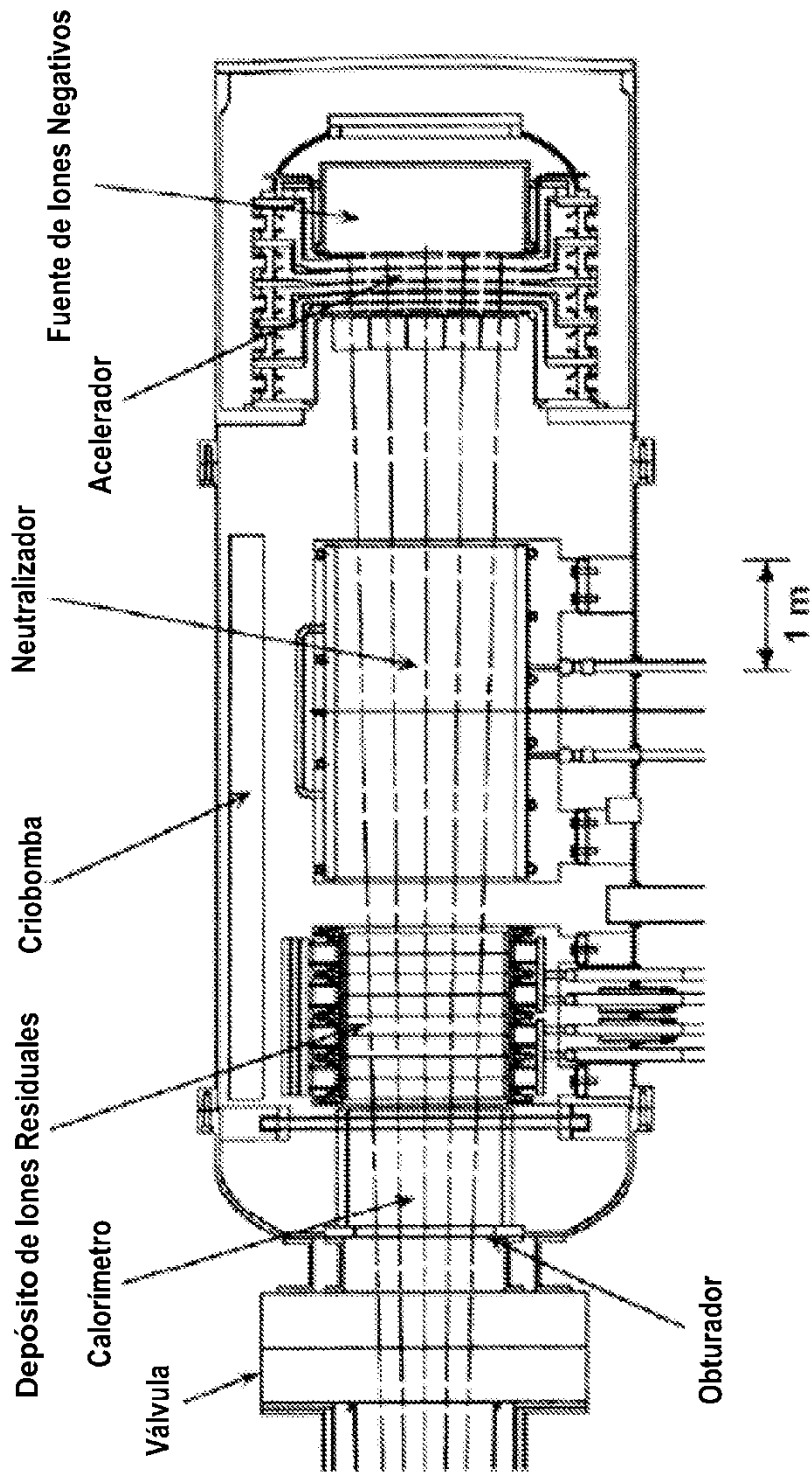


FIGURA 3

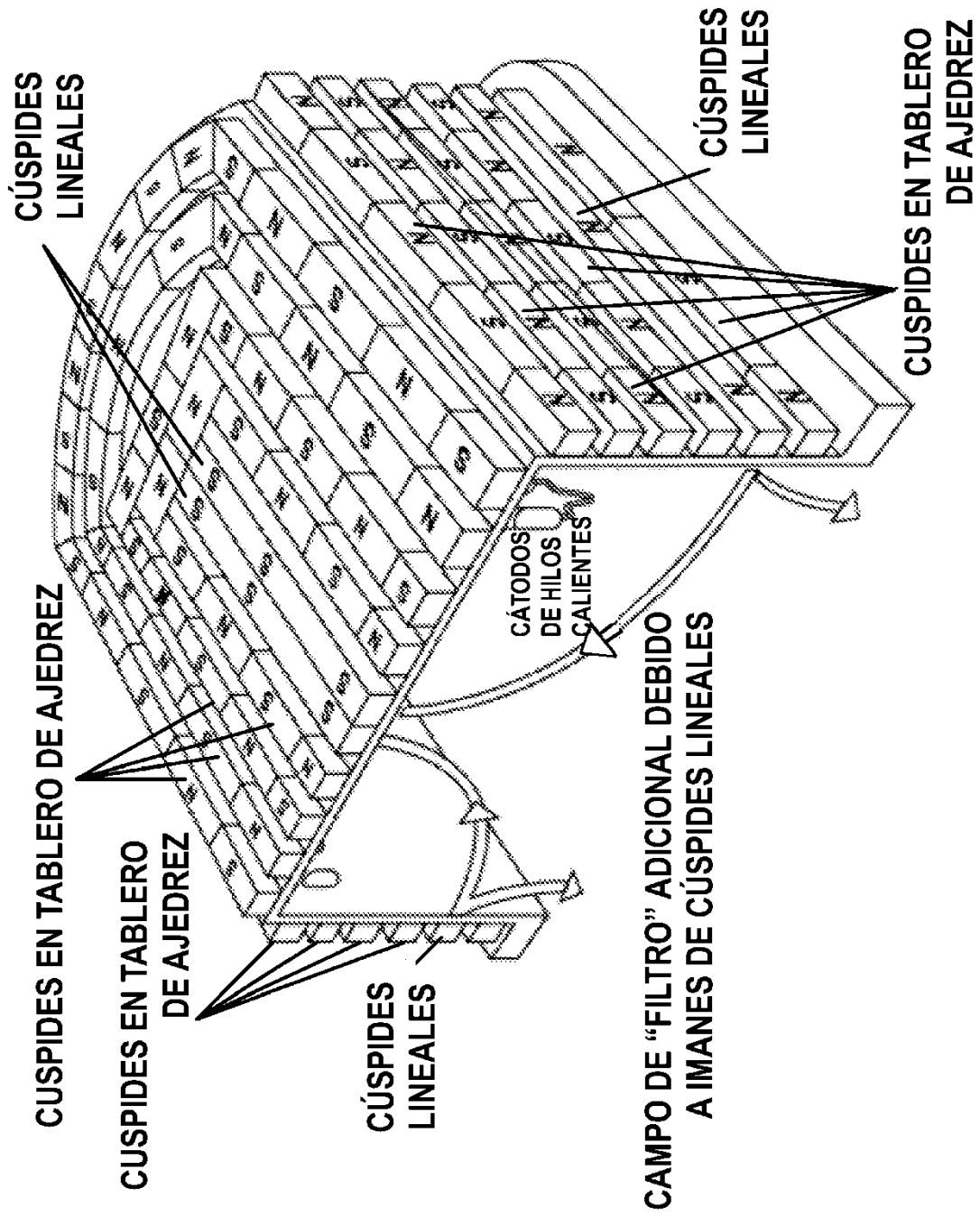


FIGURA 4

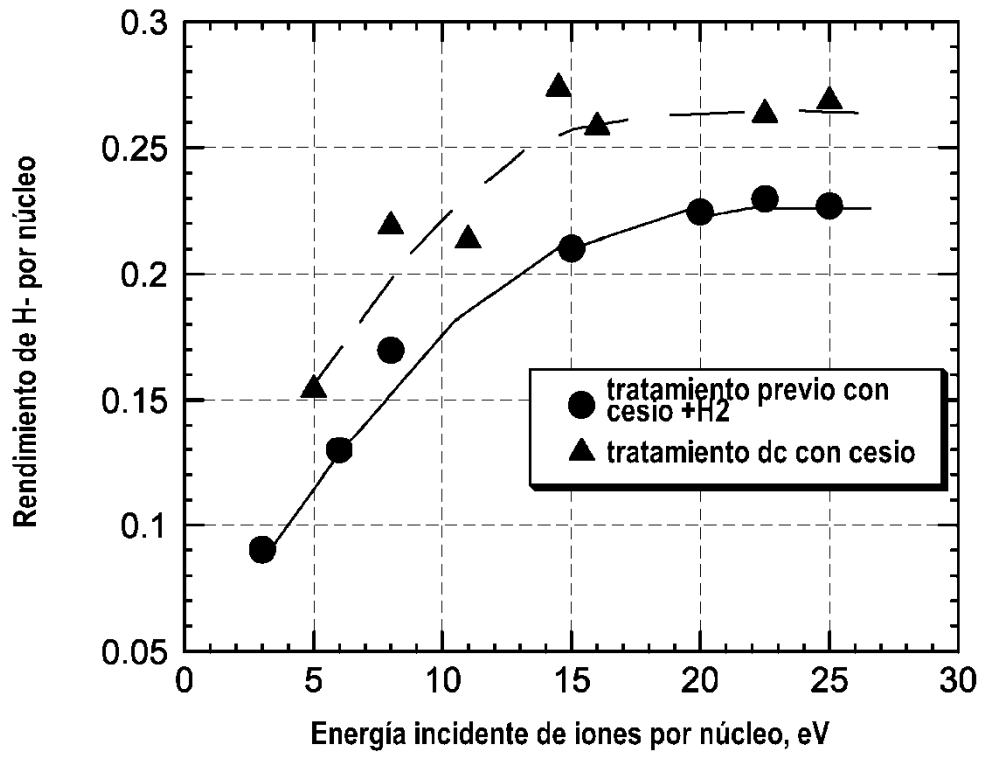


FIGURA 5

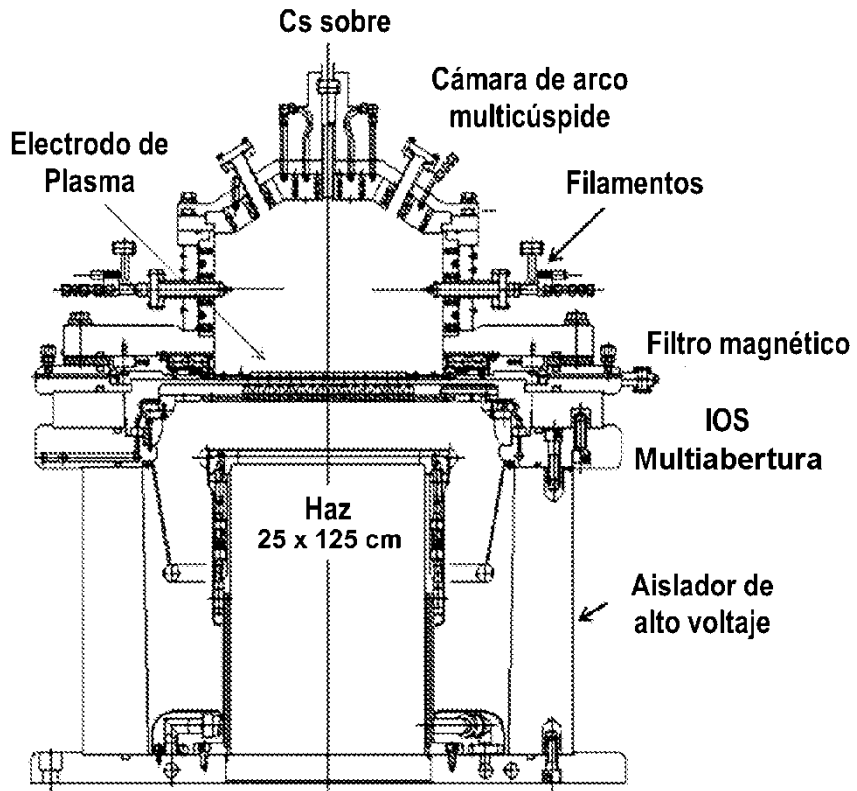


FIGURA 6

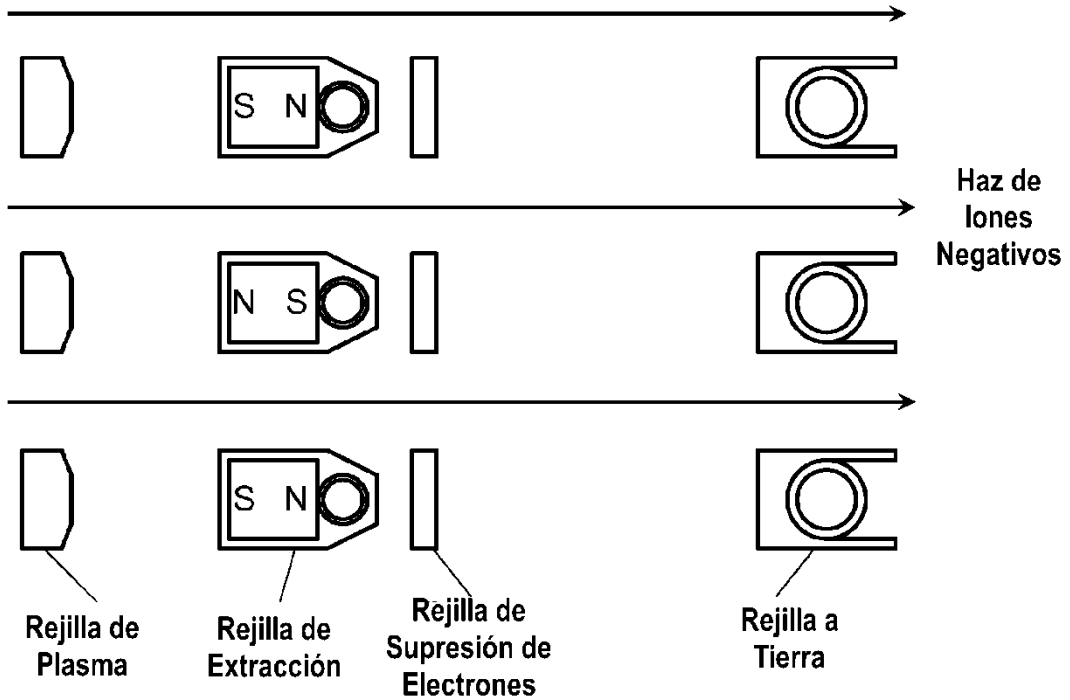


FIGURA 7

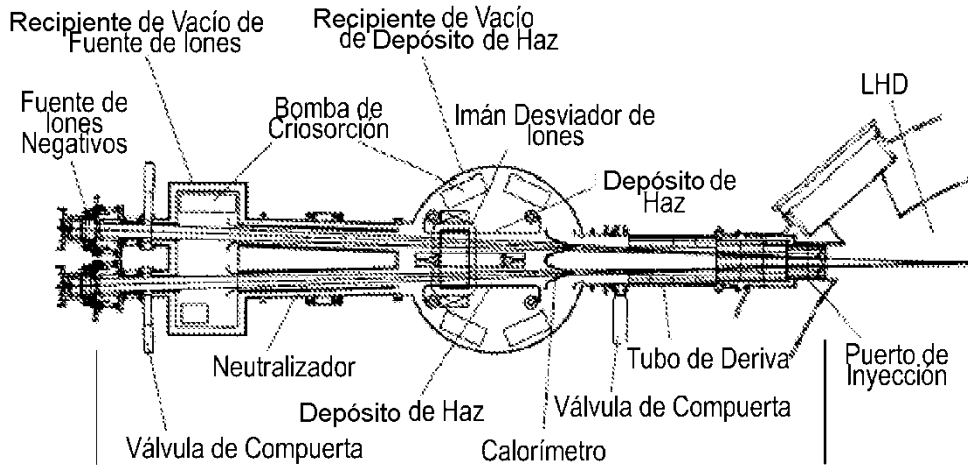


FIGURA 8A

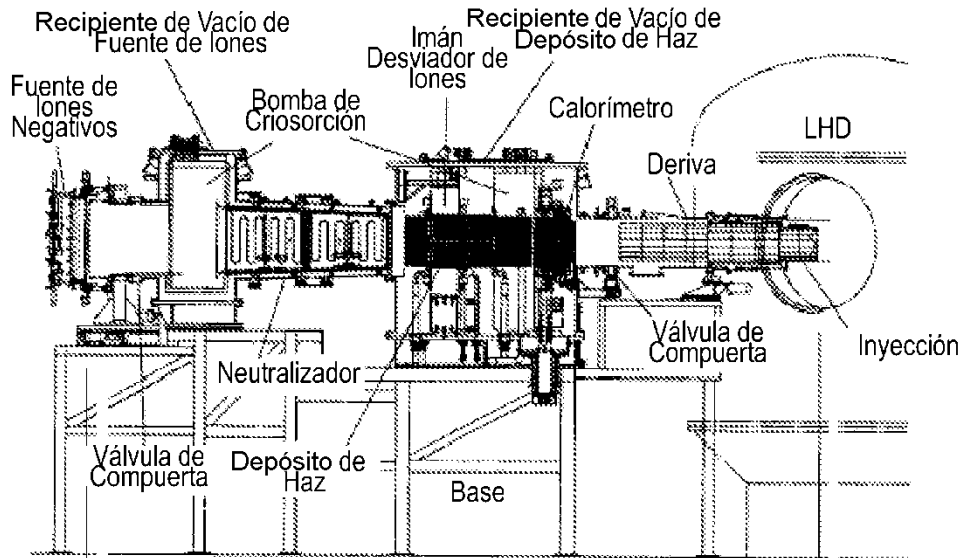


FIGURA 8B

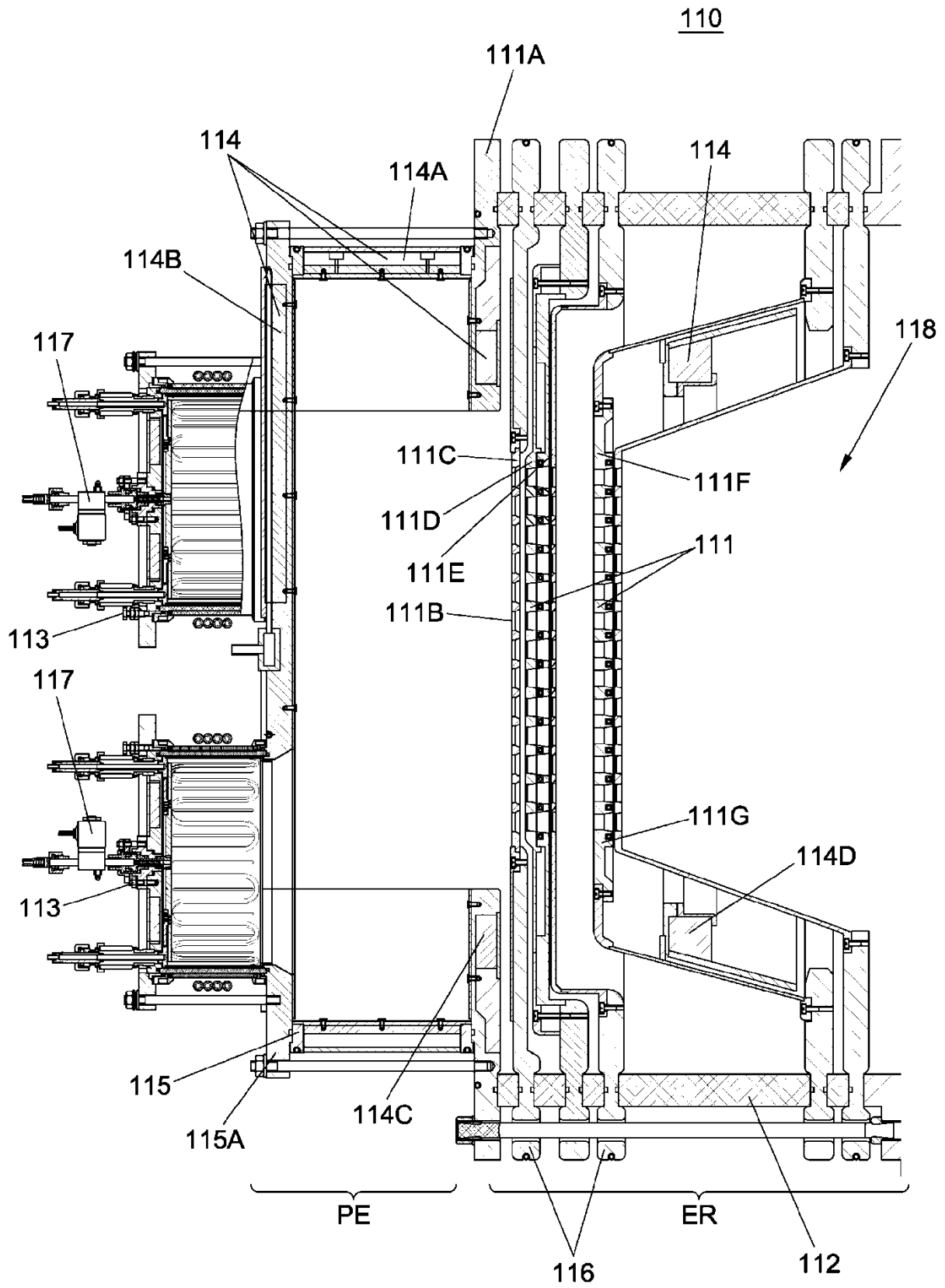


FIGURA 9

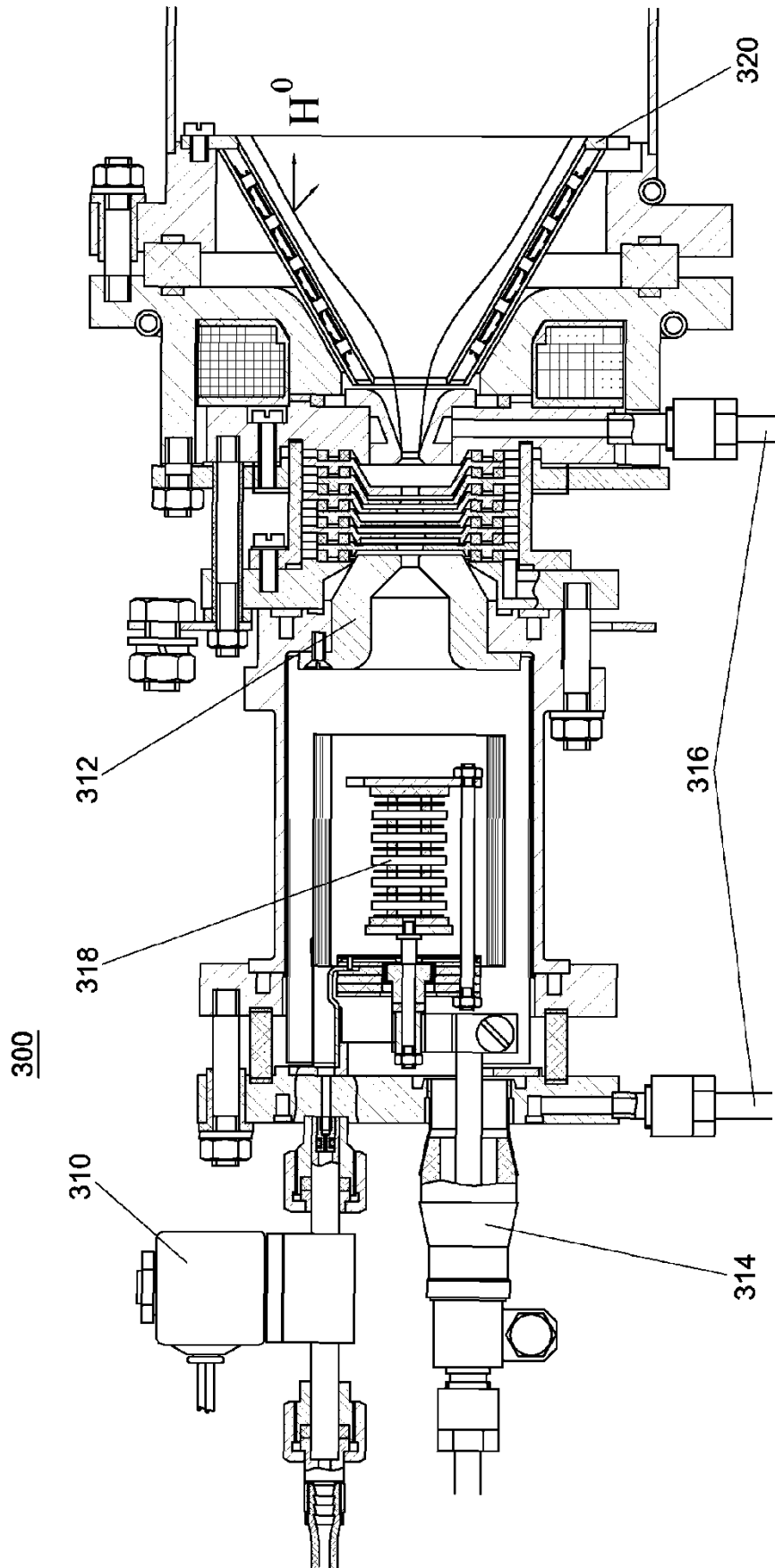


FIGURA 10



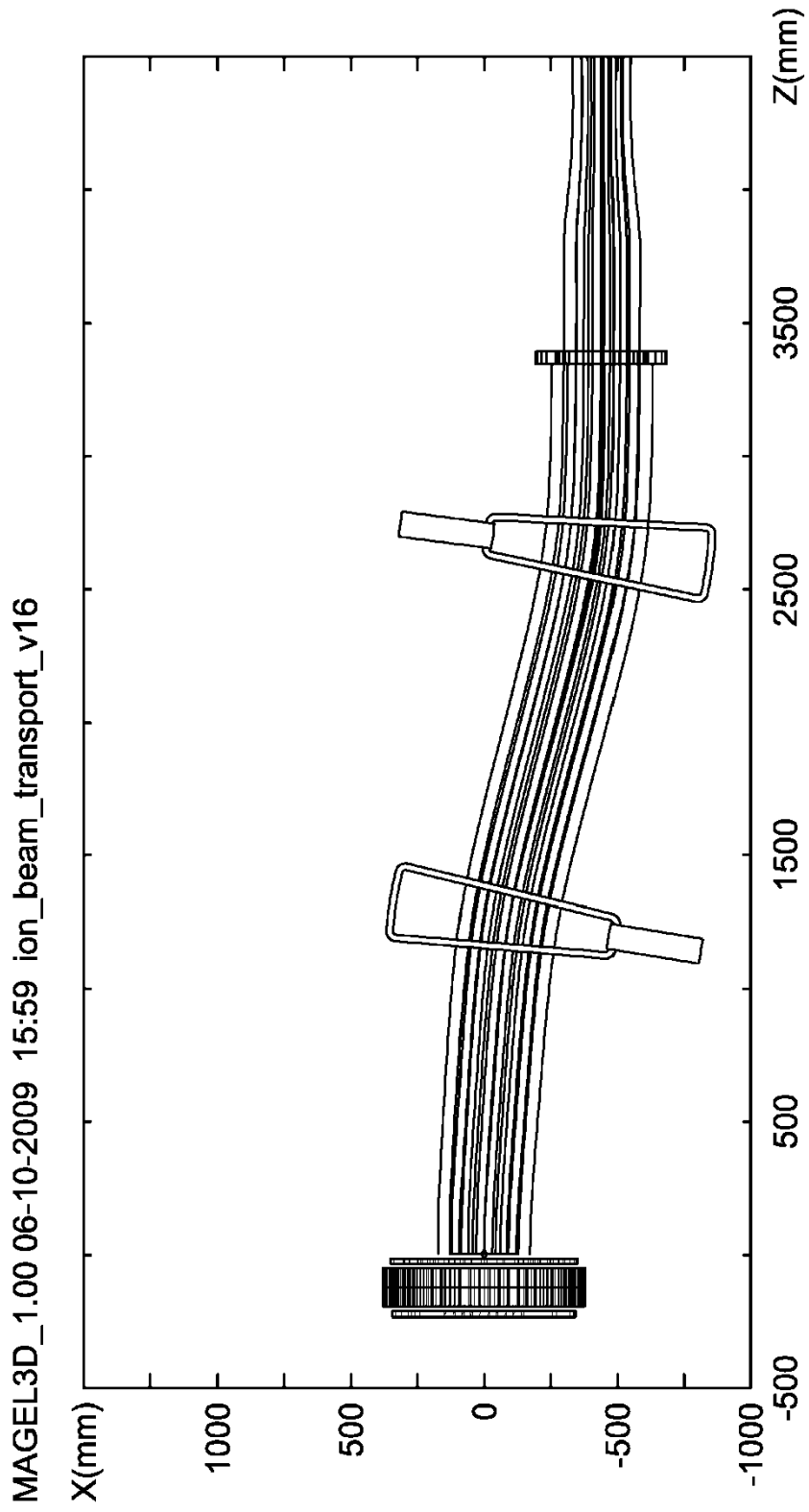
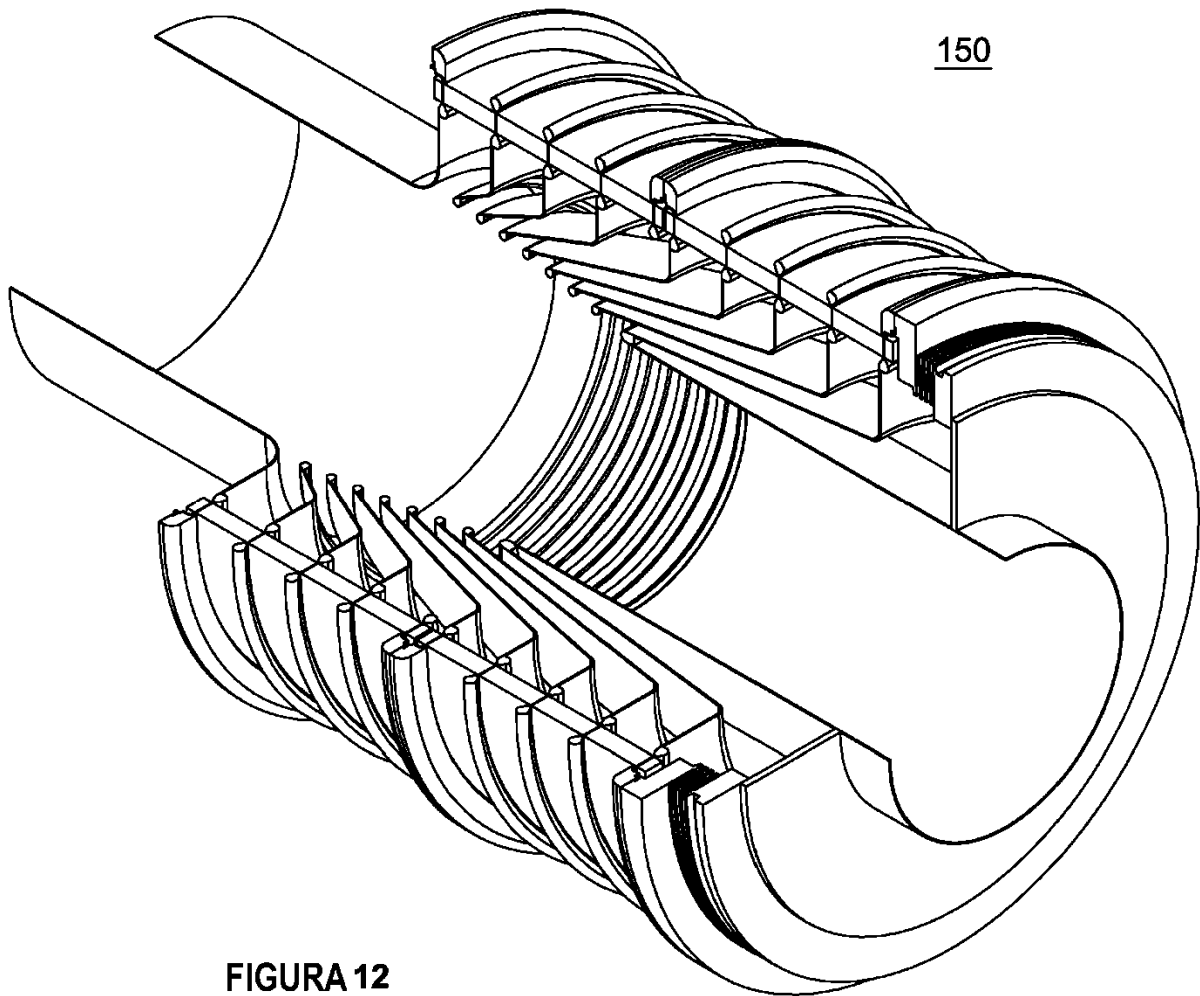


FIGURA 11



**FIGURA 12**

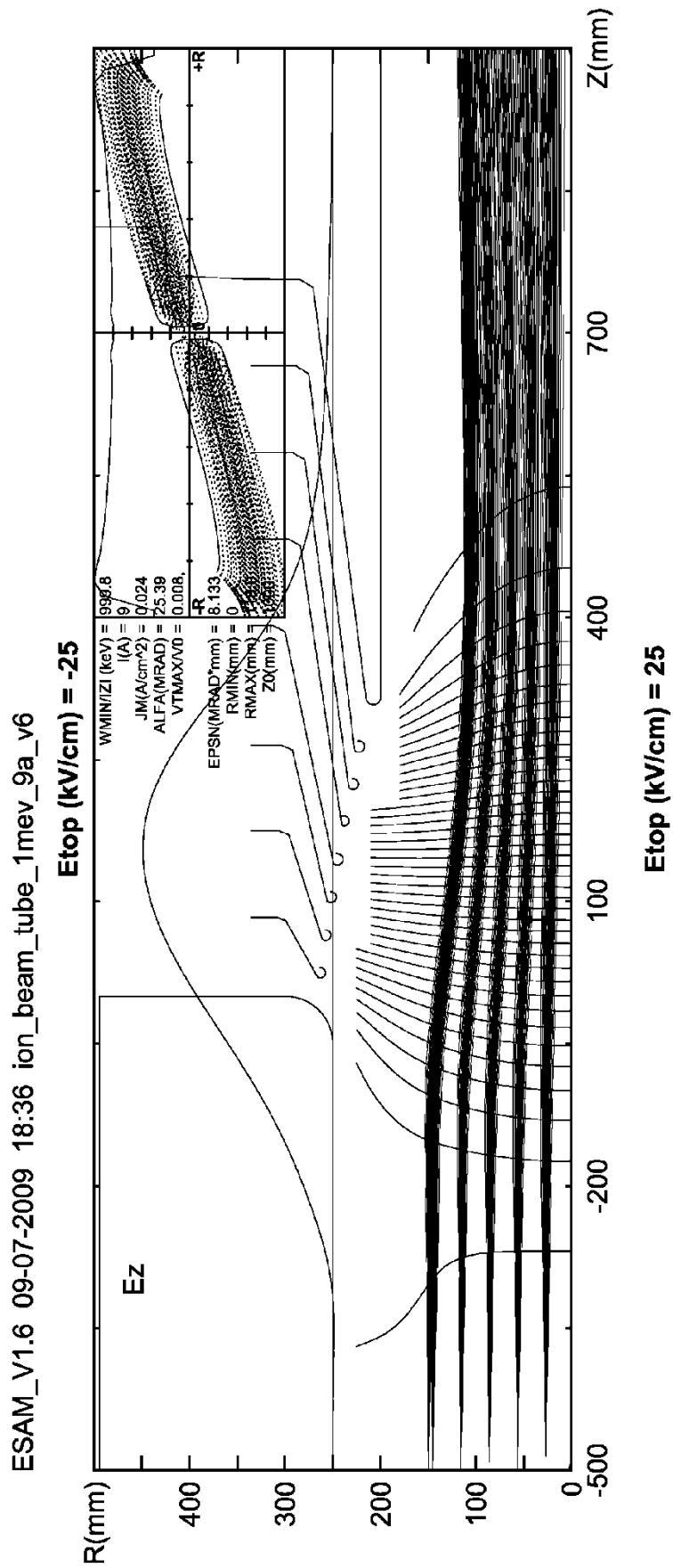


FIGURA 13

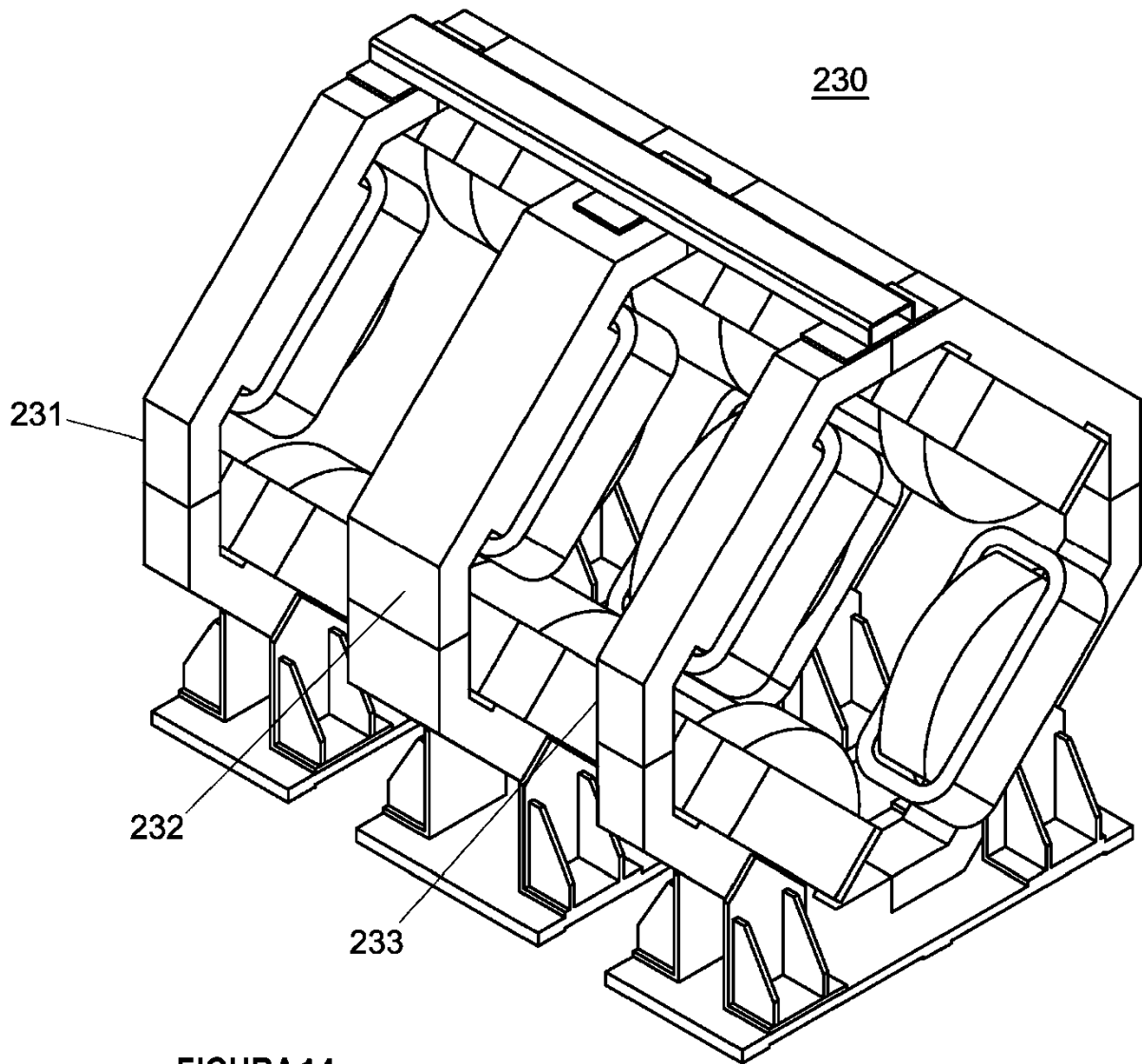


FIGURA 14

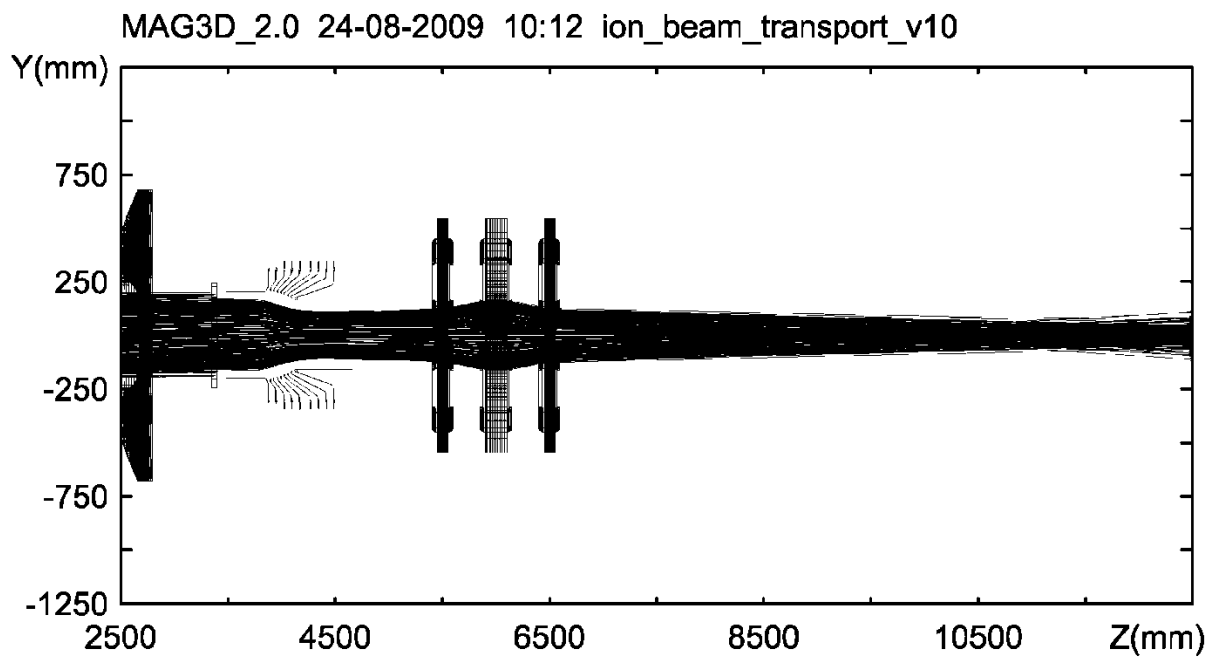
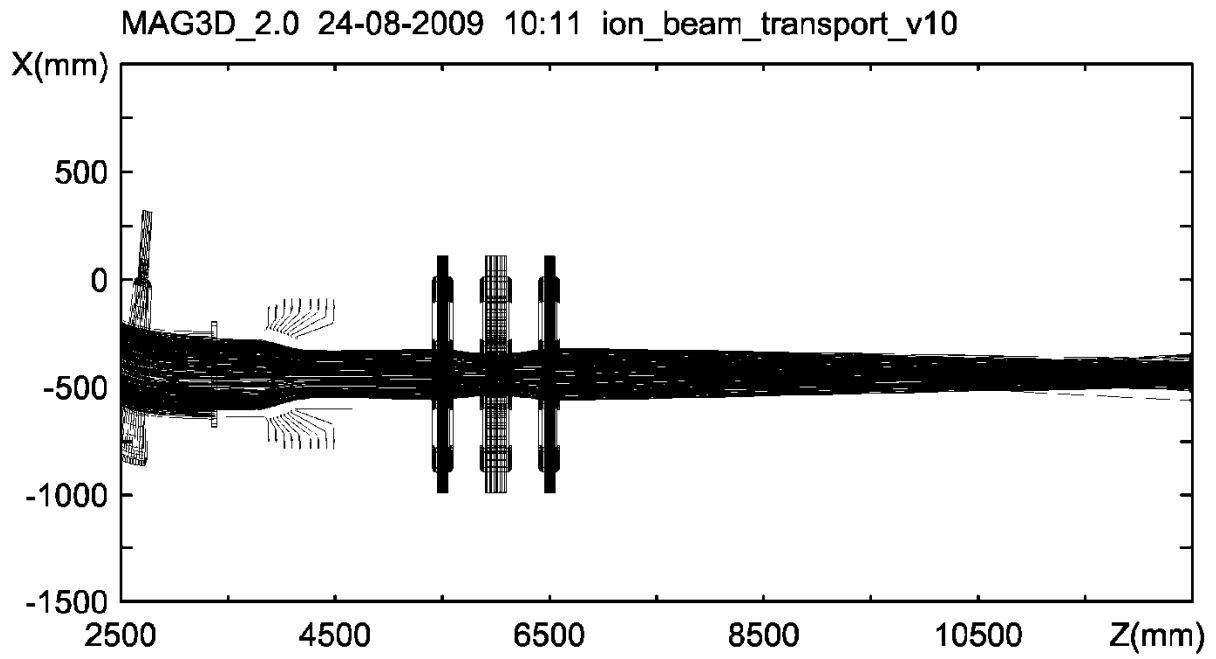
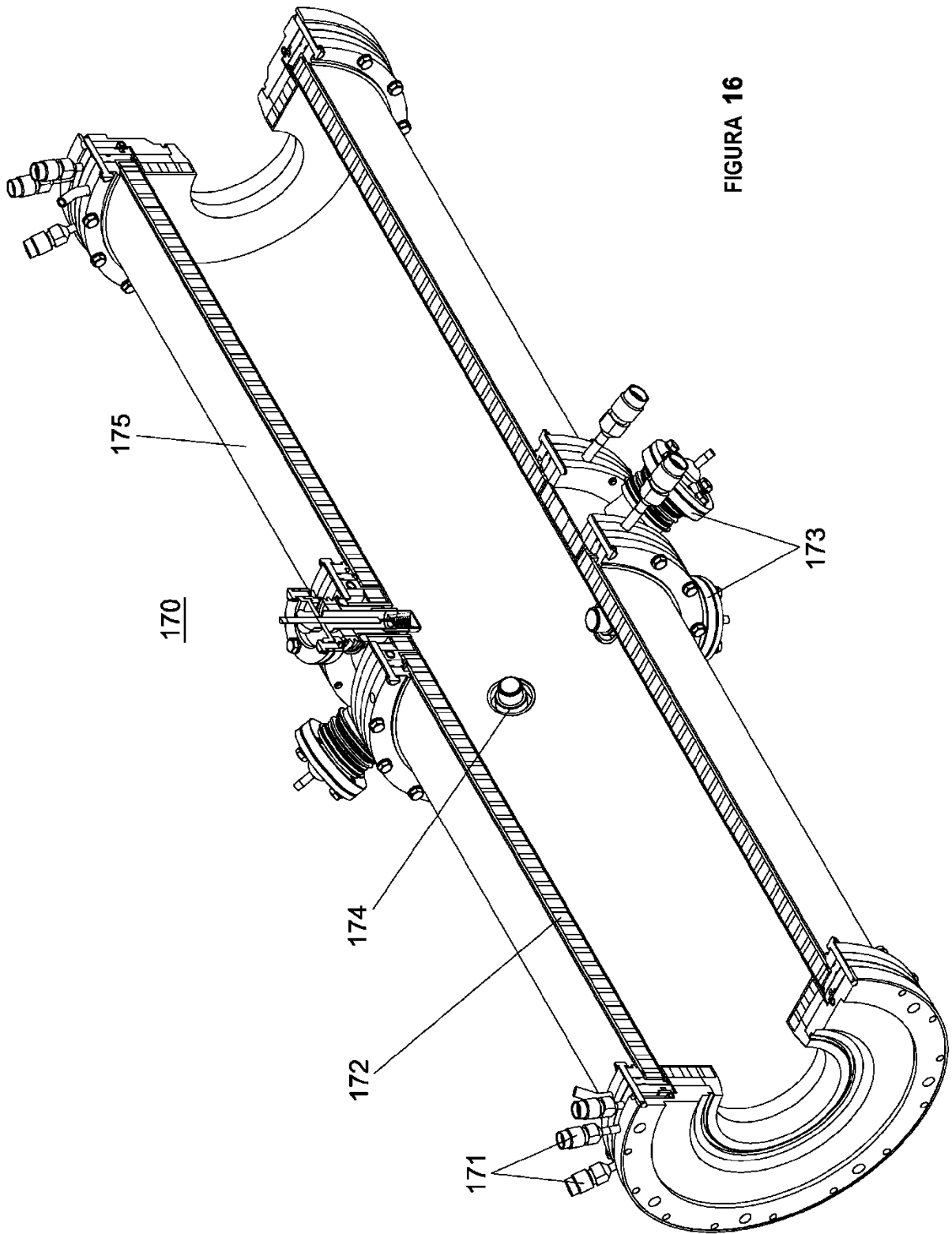


FIGURA 15



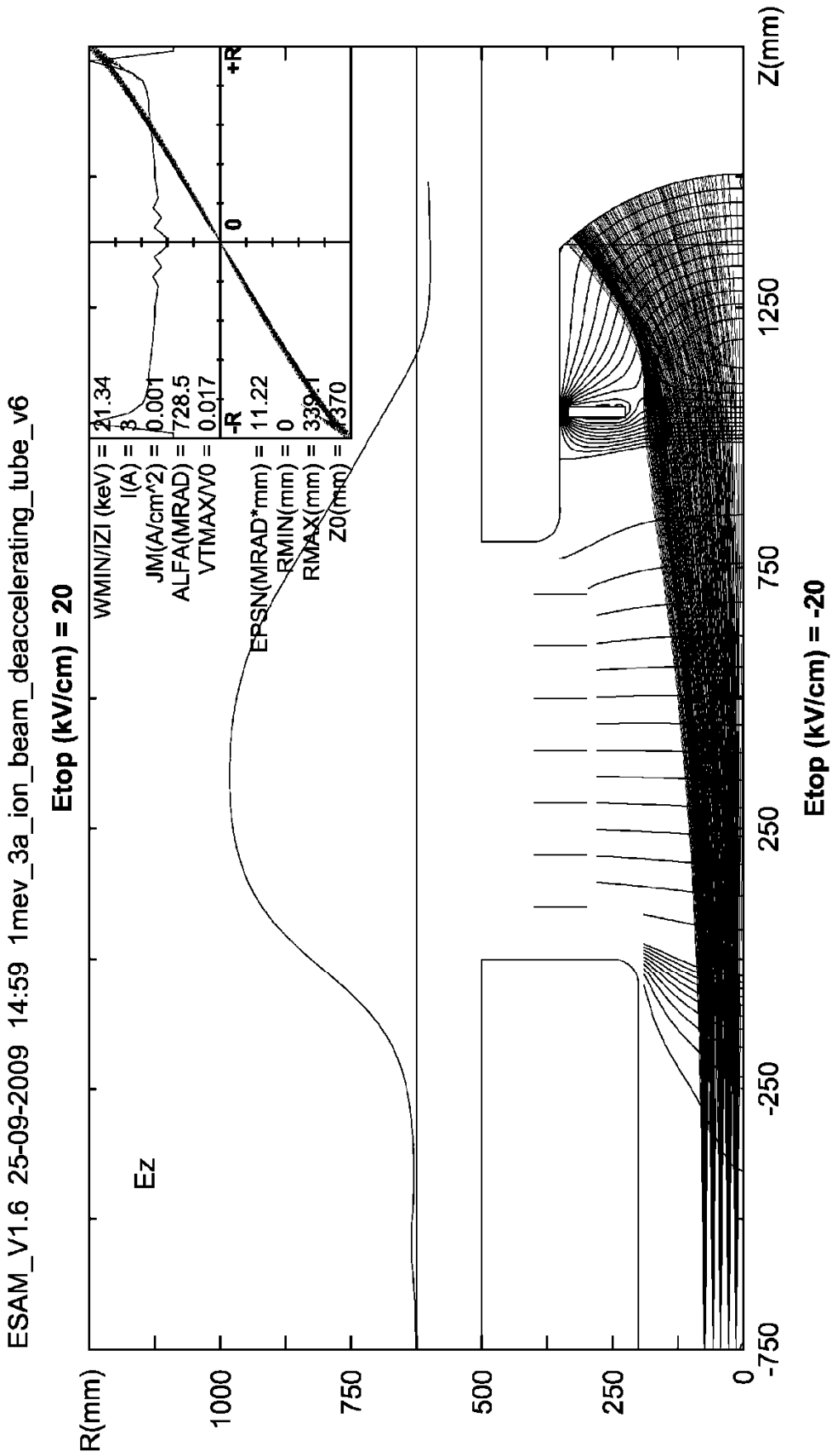


FIGURA 17